

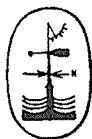
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА РОССИИ
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

СБОРНИК СТАТЕЙ

Выпуск 74



Санкт-Петербург
Гидрометеоиздат
2003

УДК 551.466.3

Ответственный редактор

И.Е.Фролов

Редакционная коллегия

*Г.В.Алексеев, А.И.Данилов (зам. отв. редактора), В.Ф.Захаров, В.В.Иванов,
Б.А.Крутских, Г.А.Лебедев, В.А.Лихоманов, В.В.Лукин, С.А.Мельников,
Е.У.Миронов, А.А.Меркулов (секретарь), Е.Г.Никифоров,
В.Ф.Радионов, В.А.Рожков, Л.А.Тимохов, О.А.Трошичев*

П 1805040600-37
069(02)-03

©Государственный научный центр РФ
Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт
(ГНЦ РФ ААНИИ), 2003 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Е.Е.Сибир, В.Ф.Радионых, А.А.Мишин. Параметры изменчивости характеристик радиационного режима на российских антарктических станциях по результатам анализа данных из архива актинометрических измерений на этих станциях	7
Ф.В.Кашин, В.Н.Арефьев, Ю.И.Баранов, А.В.Кальсин, Н.Е.Каменогрaдский, В.П.Устинов, Н.Н.Парамонова, В.И.Привалов, В.Ф.Радионых. Содержание и изменчивость водяного пара, углекислого газа и метана в атмосфере Антарктиды и над акваторией Атлантического океана	19
С.Р.Веркулич, И.Н.Кузьмина, З.В.Пушина, М.Меллес. Изменения климатических условий на побережье Антарктиды в голоцене	29
А.А.Екайкин, В.Я.Липенков, И.Н.Кузьмина. Реконструкция температуры воздуха и аккумуляции снега в Центральной Антарктиде по результатам изотопных и стратиграфических исследований снежной толщи в шурфах на станции Восток	40
В.Я.Липенков, В.А.Истомин, А.В.Преображенская. Опыт исследования азового режима подледникового озера Восток	66
С.А.Булат, Л.П.Васильева, Ж.-Р.Пети, В.В.Лукин, И.А.Алехина. Молекулярно-биологическое исследование бактериального состава воды для бурения из скважины 5Г-1, станция Восток, Антарктида	88
В.В.Масленников. О роли климатических колебаний в распределении антарктического криля (<i>Euphausia superba</i> Dana) и изменчивости популяций некоторых его основных потребителей	103
Ч.В.Чернова, Г.Дюамель. Новые данные о ранней молодежи липаровых рыб (<i>Liparidae, Scorpaeniformes</i>) района островов Кергелен и Крозе	130
О.С.Воскобойникова. Происхождение и систематика рыб подотряда нототениевидных (<i>Notothenioidei, Perciformes</i>) в свете данных онтогенетического анализа	140
В.И.Гонтарь. Вертикальное распределение фауны мшанок моря Уэдделла, Антарктика	161
Б.И.Сиренко, В.Арци, И.С.Смирнов. Фауна моря Уэдделла и ее особенности	171
О.А.Трошичев и А.С.Янжура. Воздействие возмущенного солнечного излучения на поведение температуры на Антарктическом ледниковом куполе ..	181
Эвгений Гурьевич Никифоров (к 50-летию работы в ААНИИ)	197

CONTENTS

The foreword	2
<i>Sibir E.E., Radionov V.F., Mishin A.A.</i> Parameters of variability of characteristics of radiation regime from the Russian Antarctic stations by results of the data analysis from archive actonometric measurements performed at these stations	7
<i>Kashin F.V., Aréfev V.N., Baranov Yu.I., Kal'sin A.V., Kamenogradsky N.Ye., Ustinov V.P., Paramonova N.N., Privalov V.I., Radionov V.F.</i> Water vapor, carbon dioxide and methane contents and variability in the Antarctic atmosphere and over the Atlantic ocean	19
<i>Verkulich S.R., Kuzmina I.N., Pushina Z.V., Melles M.</i> Holocene climatic changes in the Antarctic coastal areas	29
<i>Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kuzmina I.N.</i> Reconstruction of air temperature and snow accumulation in the Central Antarctica by results of isotope and stratigraphy research of snow depth in borings at «Vostok» station	40
<i>Lipenkov V.Ya., Istomin V.A., Preobrazhenskaya A.V.</i> Experience in investigations of the gas budget of subglacial Lake Vostok	60
<i>Bulat S.A., Vasiljeva L.P., Petit J.-R., Lukin V.V., Alekhina I.A.</i> Molecular-biological research of bacterial content of a liquid for drilling from a bore 5Г-1, station «Vostok», Antarctica	88
<i>Maslennikov V.V.</i> About the role of climatic oscillations in abundance of the Antarctic krill (<i>Euphausia superba</i> Dana) and variability in populations of some main krillconsumers	102
<i>Chernova N.V., Duhamel G.A.</i> New data of young liparid fish (<i>Liparidae, Scorpaeniformes</i>) in the region of Kerguelen and Crozet Islands ...	130
<i>Voskoboinikova O.S.</i> Origin and systematics of the suborder <i>Notothenioidei</i> (<i>Perciformes</i>) basing on the data of ontogenetic analysis	140
<i>Gontar V.I.</i> Vertical distribution of fauna pearlwrts in the Weddell Sea, Antarctica	162
<i>Sirenko B., Arntz W., Smirnov I.</i> Fauna of the Weddell Sea and its peculiarities	172
<i>Troshichev O.A., Yanzhura A.S.</i> Influence of the disturbing solar wind on behaviour of temperature on the Antarctic glacial cape	182
Evgeny Guryevich Nikiforov (to the 50-anniversary of work in AARI)	197

ПРЕДИСЛОВИЕ

Начиная с 1999 г. российские научные исследования в Антарктике проводятся в рамках подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» Федеральной целевой программы «Мировой океан». Начало реализации подпрограммы позволило объединить все главные направления деятельности России в Антарктике (научные исследования; прикладные разработки; мониторинг окружающей среды; охрану окружающей среды; логистическое обеспечение Российских антарктических экспедиций — РАЭ) в рамках одной подпрограммы. С этого момента у работ появился один государственный заказчик — Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, была осуществлена концентрация научных исследований на решении приоритетных вопросов исследования Антарктики, расширился круг институтов — участников антарктических исследований.

Основной целью подпрограммы является проведение научных исследований в Антарктике для получения новых данных о состоянии природы антарктики, определения прошлых, текущих и будущих изменений ее природной среды и оценка их влияния на глобальные изменения.

В 2002 г. закончился первый этап (1999 — 2002 гг.) реализации подпрограммы. Основная задача реализации подпрограммы на первом этапе состояла в завершении наиболее приоритетных исследований предыдущего пятилетия, осуществлении реорганизации работ РАЭ и стабилизации ее деятельности. Проекты НИОКР (всего 19 проектов по 8-ми тематическим разделам) входили в направление «Фундаментальные исследования южной полярной области». В выполнении НИОКР первого этапа участвовали 19 организаций семи министерств и ведомств.

В результате работ были определены параметры современного состояния климатической системы Антарктики на основе мониторинга океана, атмосферы, материкового и морского льда, а также получены количественные оценки возможных изменений климата Антарктики при росте концентрации углекислого газа в атмосфере на основе современной модели климата. Выполнены исследования влияния процессов в ионосфере на процессы и явления в приземных слоях и верхней атмосфере южного полушария. Определены механизмы и тенденции изменчивости озона и малых азотных примесей в атмосфере Антарктики. По данным ледового керна из глубокой скважины станции Восток были реконструированы палеоклима-

тические условия Антарктики за последние 420 тыс. лет, что позволил восстановить историю климата Земли на протяжении последних 4-х ледниковых периодов и 5-ти межледниковий. Установлена тесная корреляция между колебаниями температуры воздуха, концентрацией углекислого газа в атмосфере и уровнем океана. Сейсмические и радиолокационные зондирования позволили завершить картирование границ уникального подледникового озера станции Восток. Установлены мощности покрывающего озеро льда, водного слоя и осадочного чехла на дне озера. Молекулярно-биологические исследования керн озерного льда впервые позволили идентифицировать бактерии, представляющие истинную биоту озера. Исследован видовой состав, таксономическая и трофическая структура морских, пресноводных и наземных биоценозов Антарктики. В Антарктиде и на прилегающих шельфах проведены аэрогеофизические, сейсмические и гравимагнитные наблюдения на площади около 5 млн. кв. км с протяженностью профилей более 450 тыс. км, на основе которых создана совокупность цифровых геолого-геофизических карт Антарктики.

13–15 ноября 2002 г. в Санкт-Петербурге в Арктическом и антарктическом НИИ состоялась научная конференция «Исследование и охрана окружающей среды Антарктики», которая подвела итоги первого этапа подпрограммы. На конференции, прошедшей с большим успехом, был заслушан 71 доклад. Некоторые из докладов, в том числе, по современному климату Антарктики, были опубликованы в вышедших ранее сборниках «Арктика и Антарктика» (Москва, «Наука», 2002 г., вып. 2/36) и «Труды Итоговой конференции по результатам 1-го этапа реализации ФЦП «Мировой океан» (Москва, Российская академия наук, 2002 г.). В настоящий сборник «Проблем Арктики и Антарктики» включено 11 статей, основанных на докладах участников конференции. Представленные в сборнике статьи отражают результаты исследований атмосферы, океана, материкового льда Антарктики и донных осадков антарктических оазисов. Две статьи посвящены приоритетной задаче антарктических исследований — изучению уникального подледникового озера Восток. Впервые в большом объеме в «Проблемах Арктики и Антарктики» представлены статьи по биологии Антарктики.

Настоящий выпуск сборника «Проблем Арктики и Антарктики» подготовлен при частичной финансовой поддержке от подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» Федеральной целевой программы «Мировой океан».

Редакционная коллегия.

Е.Е.Сибир, В.Ф.Радионоу, А.А.Мишин

ПАРАМЕТРЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННОГО РЕЖИМА НА РОССИЙСКИХ АНТАРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ДАННЫХ ИЗ АРХИВА АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЭТИХ СТАНЦИЯХ

Первые наблюдения за солнечной радиацией в Антарктике проводились еще в 1909 году. Однако регулярные актинометрические наблюдения на Антарктическом континенте были начаты практически только в 1956—8 гг. в рамках проведения Международного геофизического года. Результаты анализа этих наблюдений за первые несколько лет приведены в книге И.П.Русина [1]. В ней впервые были исследованы особенности радиационного режима всего Антарктического материка, а также рассмотрены характерные черты радиационного климата антарктических оазисов. Более детальные характеристики радиационного режима, рассчитанные по материалам актинометрических наблюдений на сети антарктических станций за период от начала наблюдений по 1973 г., приведены в «Справочнике по климату Антарктиды» [2]. Подробный анализ параметров радиационного режима на российских антарктических станциях выполнен в монографии И.С.Маршуновой [3]. В ней использованы материалы актинометрических некоторых сопутствующих наблюдений на 28 советских и зарубежных антарктических станциях за период с 1956 по 1975 гг. Позднее в ряде публикаций [4—6] проанализированы основные характеристики радиационного климата Антарктиды в зависимости от формирующих их факторов и с учетом новых данных актинометрических наблюдений. При этом преимущественно анализировались данные месячной дискретности — месячные суммы характеристик радиационного режима, средние за месяц величины коэффициентов интегральной прозрачности и т.д. Результаты показали, в частности, и то, что для детального понимания роли тех или иных факторов, формирующих радиационный режим в Антарктиде, необходим анализ дан-

ных актинометрических наблюдений с меньшей, чем месяц, дискретностью. Поэтому актуальным являлось создание электронного архива, который включал бы сами данные срочных актинометрических измерений, проводившихся на российских антарктических станциях, часовые суммы параметров радиации, полученные с помощью регистраторов, а также сопутствующую метеорологическую информацию. Это даст возможность детально проанализировать с его помощью характеристики радиационного режима в Антарктиде с учетом формирующих их факторов.

ОПИСАНИЕ АРХИВА АКТИНОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В создаваемый архив актинометрических данных российских антарктических станций включена информация срочных актинометрических наблюдений, сопутствующая метеорологическая информация (таблицы ТМ-12) и данные регистраторов (часовые суммы различных элементов радиационного баланса, таблицы ТМ-13) за весь период наблюдений.

Для выявления как ошибок занесения информации на носитель, так и ошибок наблюдений была разработана методика контроля качества вводимой в архив информации. Сначала с помощью созданной для этой цели программы проводился объективный контроль вносимых в архив данных (метод контроля описан ниже), а затем сомнительные и забракованные величины подвергались экспертному контролю и при необходимости корректировались. В результате такого критического контроля в архив дополнительно к самой актинометрической информации вносится код ее качества указывающий на наличие сомнительных или ошибочных данных.

Структура единичной записи данных срочных измерений, соответствующая информации таблицы ТМ-12, приведена в табл. 1. Все данные представлены в ASCII кодах. Число позиций, отводимых той или иной характеристике, зависит от ее вида и, для инструментально измеряемых параметров, от точности измерений. Количество десятичных знаков (число разрядов после десятичной точки), определяемое точностью измерения или расчета параметра, приводится в специальной графе.

Код отсутствия данных может быть приведен в виде 9, 99, 999 или 9999 в зависимости от числа позиций, занимаемых соответствующей характеристикой. Исключение составляет код отсутствия данных для альбедо, имеющих вид 00, поскольку само значение альбедо может равняться 99 %.

Кодировка сопутствующих метеорологических параметров дана в соответствии с [7, 8]. В графах таблицы ТМ-12, соответствующих баллу общей и нижней облачности, обычно помечаются случаи наличия следов облачности. Они закодированы значением 11. Случаи, когда при облачности 10 баллов имеются просветы, закодированы величиной 12. В графах

Таблица 1.

Структура записи в архив данных срочных актинометрических наблюдений

Элемент	Длина записи в байтах	Число десятичных знаков
Год	4	
Месяц	2	
Координатный номер станции	7	
Шифр вида наблюдений (срочные наблюдения – 7100)	4	
День	2	
Срок наблюдений	4	
Высота Солнца (h), градусы	3	1
Радиационный баланс без прямой радиации ($B-S'$)	4	2
Характеристика качества (QA)	1	
Радиационный баланс (B)	4	2
Характеристика качества (QA)	1	
Длинноволновый радиационный баланс (Bd)	4	2
Характеристика качества (QA)	1	
Отраженная радиация (R)	3	2
Характеристика качества (QA)	1	
Прямая радиация на перпендикулярную поверхность (S)	3	2
Характеристика качества (QA)	1	
Прямая радиация на горизонтальную поверхность (S')	3	2
Характеристика качества (QA)	1	
Рассеянная радиация (D)	3	2
Характеристика качества (QA)	1	
Суммарная радиация (Q)	3	2
Характеристика качества (QA)	1	
Альбедо (A)	2	
Характеристика качества (QA)	1	
Состояние диска Солнца	1	
Балл общей облачности	2	
Балл нижней облачности	2	
Форма облаков	5	
Состояние подстилающей поверхности	2	
Температура поверхности почвы	3	
Температура воздуха	4	1
Абсолютная влажность воздуха	3	1
Атмосферные явления	2	
Скорость ветра	2	

Примечание: длина записи – 90 байт

«Атмосферные явления» помимо самого значения, характеризующего вид явления, указывается и степень его интенсивности. Поэтому этой характеристике отведены две позиции, первая из которых характеризует шифр самого явления, а вторая – его интенсивность (0 – слабая, 1 – умеренная, 2 – сильная) [7,8].

Таблица 2

**Структура записи в архив данных
регистрации радиационных характеристик**

Элемент	Длина записи в байтах	Повторяемость
Год	4	24
Месяц	2	
Координатный номер станции	7	
Шифр вида регистрации	4	
День	2	
Суточная сумма радиации	4	
Характеристика качества (QA)	1	
Часовые суммы радиации (24 за сутки)	3	

Примечание: длина записи — 96 байт

В таблице 2 приведена структура единичной записи данных регистрации часовых сумм радиации (соответствует информации таблицы ТМ-13).

Коды отсутствия данных — 999 или 9999 для часовых и суточных сумм радиации соответственно.

В обоих случаях (срочные данные и данные регистрации) характеристики качества информации имеют следующие значения: 0 — величина корректна, 1 — величина сомнительна, 2 — величина восстановлена, 3 — величина забракована, 9 — контроль качества не проводился.

Для идентификации вида информации каждому ее типу присвоен свой шифр: 7100 — срочные наблюдения, 7101 — часовые суммы прямой солнечной радиации на перпендикулярную поверхность; 7102 — часовые суммы рассеянной радиации; 7103 — часовые суммы суммарной радиации, 7105 — часовые суммы радиационного баланса; 7106 — часовые суммы отраженной радиации.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АРХИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Объективный контроль заносимой в архив информации состоит из нескольких этапов и осуществляется двумя способами:

- контролем соответствия величины измеренного потока радиации допустимым для данной характеристики пределам изменчивости;
- сравнением измеренной величины с другими видами радиации и соответствующими значениями этой же величины, рассчитанными по другим измеренным радиационным характеристикам.

Поскольку в шестидесятые и семидесятые годы XX века все потоки радиации измерялись в кал/см²·мин, а часовые суммы в кал/см², одновре-

менно с контролем вводимой в архив информации осуществлялся и ее пересчет в современные единицы.

На первом этапе контроля качества срочных актинометрических наблюдений проводится контроль информации (прямой солнечной радиации, приходящей на перпендикулярную поверхность (S) и суммарной радиации (Q)) на непревышение критических значений, которые были получены М.С.Маршуновой для различных высот Солнца на различных антарктических станциях (см. табл. 3 и 4). В случае превышения анализируемой характеристикой критического значения (при этом критическое значение для необходимой высоты Солнца рассчитывается путем линейной интерполяции) критерию качества QA этой величины присваивается значение 3 (величина забракована) и выдается информация для субъективного контроля.

Таблица 3.

Максимально возможные величины потока прямой солнечной радиации на перпендикулярную поверхность, кВт/м²

Районы	Высота Солнца, град.			
	10	20	30	40
Станция Восток	0,97	1,11	1,15	–
Побережье	0,86	0,99	1,08	1,12
Станция Беллинсгаузен	0,79	0,92	1,01	1,07

Таблица 4.

Максимально возможные величины потока суммарной радиации, кВт/м²

Районы	Высота Солнца, град.			
	10	20	30	40
Станция Восток	0,36	0,59	0,75	–
Побережье	0,31	0,58	0,74	0,98
Станция Беллинсгаузен	0,26	0,49	0,68	0,93

На втором этапе проводится контроль выполнения объективно существующих соотношений между различными видами радиации. Для этого проверяется выполнение следующих условий:

$$S' < Q;$$

$$R < Q \text{ либо } R = Q.$$

Второе условие возможно только в случае, если высота Солнца $h < 10^\circ$ и снегом покрыто более 50 % подстилающей поверхности.

$$\begin{aligned}
 D &\leq Q; \\
 B &\leq Q; \\
 (B - S') &\leq D; \\
 Bd &\leq 0.
 \end{aligned}$$

Соотношение $Bd > 0$ возможно только при условии, что нижняя облачность не менее 10 баллов.

Этот этап контроля проводится только для характеристик радиации, успешно прошедших первый этап. В случае выполнения перечисленных условий критерий качества остается равным нулю, а при их невыполнении ему присваивается значение 3 и соответствующая информация выдается для дальнейшего экспертного анализа.

На третьем этапе проверяется совпадение измеренной величины радиации и соответствующей величины, рассчитанной по имеющимся данным о других видах радиации. С этой целью использовались следующие соотношения:

$$\text{— для суммарной радиации} \quad Q = S' + D; \quad (1)$$

$$\text{— для рассеянной радиации} \quad D = Q - S'; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{— для прямой солнечной радиации на горизонтальную} \\ \text{поверхность} \end{aligned} \quad S' = S \sin(h), \quad (3)$$

$$S = Q - D; \quad (4)$$

$$\text{— для отраженной радиации} \quad R = Bd - B + Q; \quad (5)$$

$$\text{— для радиационного баланса} \quad B = Bd - R + Q; \quad (6)$$

$$\text{— для баланса длинноволновой радиации} \quad Bd = B + R - Q; \quad (7)$$

$$\text{— для баланса без прямой радиации} \quad (B - S') = B - S', \quad (8)$$

где $(B - S')$ — непосредственно измеряемое значение;

$$\text{— для альбедо} \quad A = R/Q. \quad (9)$$

Расчеты по указанным формулам проводятся в случае, если имеются в наличии необходимые данные и ни одна из входящих в формулу вели-

гин не была забракована на предыдущих этапах контроля. Допустимая разница между измеренными и рассчитанными величинами потоков радиации задается равной $0,05 \text{ кВт/м}^2$, а для альбеда равной 5%. При выполнении описанных соотношений критерий качества остается равным 0, а в случае невыполнения ему присваивается значение 1 и информация передается для экспертного контроля.

Контроль качества вносимых в архив часовых сумм различных характеристик радиации также проводится в два этапа. На первом этапе проверяется соответствие суточных сумм радиации, занесенных в таблицы, и суточных сумм, рассчитанных по измеренным часовым суммам. В случае совпадения этих величин критерию качества присваивается значение 0, а при не совпадении — 3. На втором этапе проводится контроль выполнения существующих соотношений между различными видами радиации. Для этого проверяется выполнение следующих условий: $S' \leq Q (S' = S \sin(h))$; $R \leq Q$; $D \leq Q$; $B \leq Q$; $(B - S') \leq D$.

Второй этап контроля, как и при контроле срочных измерений, проводится, только если рассматриваемая характеристика успешно прошла первый его этап. При выполнении соответствующего условия критерий качества суточной суммы анализируемой характеристики радиации остается равным 0, а в противном случае ему присваивается значение 1. Затем также проводится экспертный контроль забракованной информации.

Проконтролированная информация заносится в архив, который организован постанционно. Для идентификации актинометрической информации (см. табл. 1 и 2) в начале каждой строки записываются номер года, номер месяца, координатный номер станции, шифр вида информации, номер дня месяца, а в случае срочных наблюдений в идентификационную часть строки добавляется также время измерений.

Помимо данных измерений архив содержит также описания истории проведения измерений (возможных переносов площадок наблюдений, изменений приборов, чрезвычайных ситуаций на станциях и т. д.) для каждой станции.

К настоящему времени архив включает проконтролированные данные актинометрических измерений на шести станциях (Беллинсгаузен, Восток, Ленинградская, Мирный, Молодежная, Новолазаревская) за период с начала наблюдений по 1989 г. Продолжаются работы по его пополнению уже имеющимися и вновь получаемыми данными.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАДИАЦИОННОГО РЕЖИМА НА РОССИЙСКИХ АНТАРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

Представленные ниже результаты получены по данным о месячных и годовых суммах радиационных параметров за весь период наблюдений на Российских антарктических станциях.

Поскольку большая часть Антарктического континента расположена за полярным кругом, это обуславливает крайне неравномерное поступление солнечной радиации в течение года. Прозрачность атмосферы на Антарктидой близка к идеальной, что связано с малым содержанием в нем водяного пара и аэрозолей. Почти вся поверхность Антарктиды (96 %) имеет снежно-ледовый покров, обладающий высоким альбедо (80–90 %) солнечной радиации. Режим облачности определяется особенностями атмосферной циркуляции. Он заметно отличается в разных районах Антарктиды (центральное плато, западный и восточный склоны, побережье). Так режим облачности антарктического побережья, где расположена основная часть научных станций, складывается под влиянием часто повторяющихся циклонов и сильных стоковых ветров. В центральных районах большую роль в формировании радиационного климата играют температурные инверсии частота повторяемости которых достигает там 96–99 % [3].

Своеобразие радиационного режима различных районов Антарктиды находит свое отражение в различиях его параметров, полученных для конкретных станций. Так, радиационный режим станции Восток характерен для центральных районов Антарктиды, станции Мирный – для условий ледникового побережья, станции Молодежная и Новолазаревская – для антарктических оазисов, значительная часть территории которых свободна от снега большую часть года, станции Беллинсгаузен – для условий антарктического полуострова.

В табл. 5 приведены сведения о периодах, для которых анализировались ряды месячных и годовых сумм радиационных параметров.

На рис.1 представлен средний многолетний внутригодовой ход месячных сумм параметров радиационного режима. Видно, что для месячных сумм прямой, приходящей на перпендикулярную поверхность (S) рассеянной (D) и суммарной (Q) радиации имеется четкий сезонный ход, с максимумом в декабре–январе, обусловленный сезонными изменениями продолжительности светового дня и высоты Солнца.

Таблица 5

Периоды наблюдений на российских антарктических станциях, использованные для анализа радиационных характеристик

Станция	S	D	Q	R	B
Беллинсгаузен	1968–1977	1968–1977	1968–2002	1968–1977	1968–1977
Восток	1963–1991	1958–1991	1958–2002	1958–1991	1958–1991
Ленинградская	1971–1978	1971–1978	1972–1989	1971–1975	1971–1975
Мирный	1963–1996	1956–1996	1956–2002	1956–1996	1956–1996
Молодежная	1963–1992	1963–1996	1963–1998	1963–1996	1963–1996
Новолазаревская	1963–1991	1961–1991	1961–2002	1961–1999	1963–1991

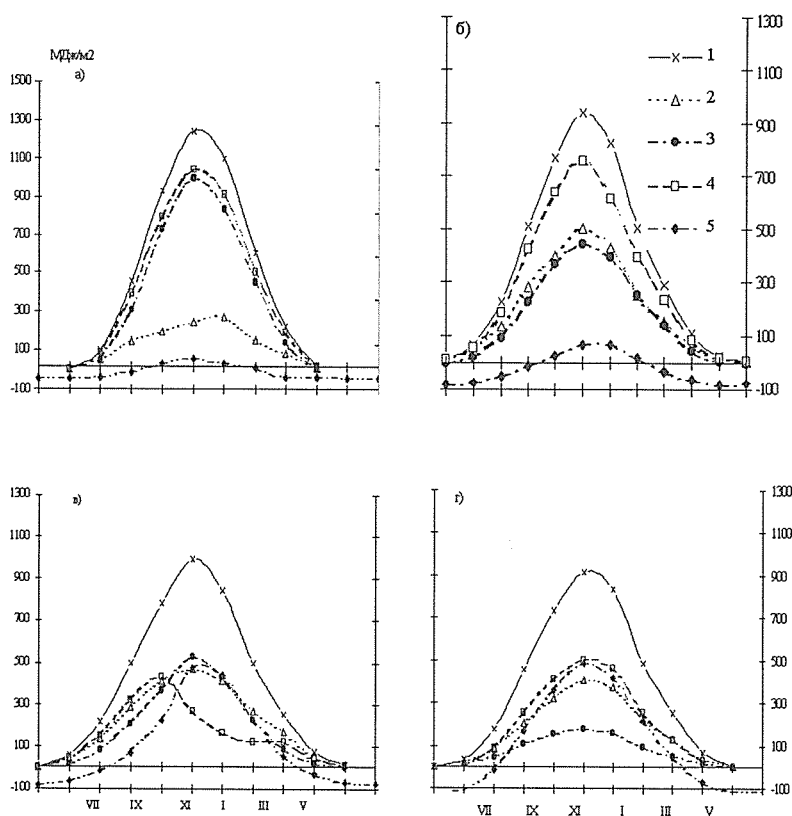


Рис. 1. Годовой ход параметров радиационного режима на станциях Восток (а), Мирный (б), Молодежная (в), Новолазаревская (г).
— 1 — Q; 2 — D; 3 — R; 4 — S'; 5 — D

В период с октября по февраль суммы прямой радиации максимальны а станции Восток, на прибрежных станциях они сравнимы между собой и примерно вдвое меньше, чем на Востоке. На станции Беллинсгаузен месячные суммы S в 3—4 раза меньше, чем на других прибрежных станциях, го связано с особым характером атмосферной циркуляции и режима об- ачности в этом районе. Месячные суммы рассеянной радиации, наоборот, инимальны на Востоке, а на прибрежных станциях примерно вдвое боль- е, чем внутри континента.

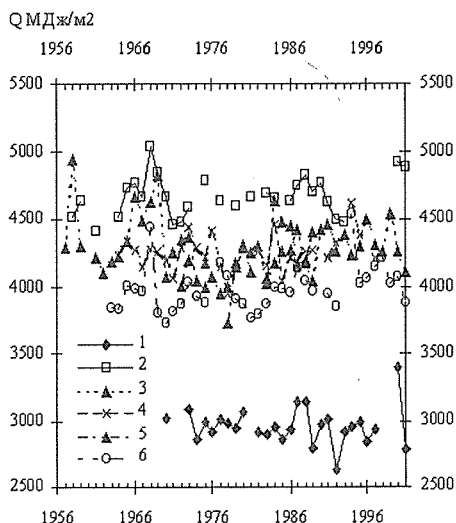


Рис. 2. Годовые суммы суммарной радиации на российских станциях.
1 — Беллинсгаузен; 2 — Восток; 3 — Мирный; 4 — Молодежная; 5 — Ленинградская; 6 — Новолазаревская

Из-за такого режима прямой и рассеянной радиации месячные суммы суммарной радиации оказываются заметно выше на Востоке, чем на прибрежных станциях, только в декабре — январе. В остальные месяцы они близки между собой.

Относительный вклад прямой и рассеянной радиации в суммарную мало изменяется от месяца к месяцу. На прибрежных станциях вклады S' (прямая радиация, приходящая на горизонтальную поверхность) и D примерно одинаковы, на станции Восток доля S' увеличивается до 80 %, а на станции Беллинсгаузен, наоборот, до 70–80 % увеличивается доля рассеянной радиации.

Годовые суммы суммарной радиации максимальны на ст. Восток и минимальны на ст. Беллинсгаузен (см. рис.2). Среднемноголетняя годовая сумма суммарной радиации на ст. Восток составляет 4679 МДж/м^2 , на ст. Беллинсгаузен — 2981 МДж/м^2 .

Отражательные свойства земной поверхности характеризуются величиной альбедо, представляющей собой отношение отраженной радиации к радиации, приходящей на поверхность. Как показано в [3], альбедо реальных подстилающих поверхностей в Антарктиде колеблется в больших пределах: от 10–15 % для каменистого грунта до 90–95 % для свежеснежного покрова. Поэтому своеобразие режима отраженной радиации для каждой стан-

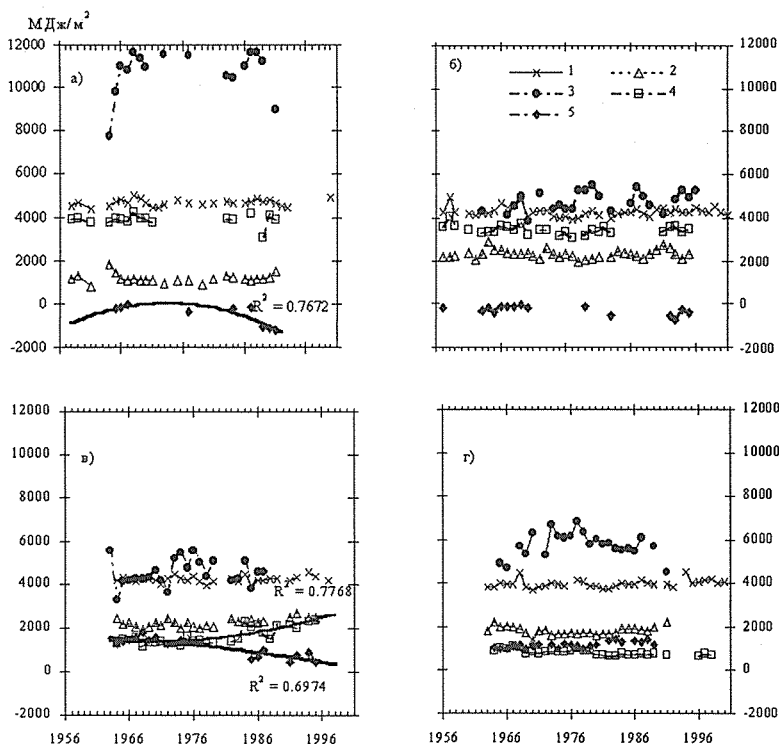


Рис.3. Годовые суммы параметров радиационного режима на российских станциях Восток (а), Мирный (б), Молодежная (в) и Новолазаревская (г). 1 — Q, 2 — D, 3 — S, 4 — R, 5 — B

дии в основном определяется характером ее подстилающей поверхности. Средняя годовая сумма отраженной радиации максимальна на ст. Восток 3925 МДж/м^2 и минимальна на ст. Новолазаревская (830 МДж/м^2). Сезонный ход месячных сумм отраженной радиации на каждой станции определяется сезонным ходом месячных сумм суммарной радиации и альбедо.

В центральных районах Антарктиды (Восток) и в районах ледниково-го побережья (Мирный) месячные суммы баланса положительны только в период с ноября по февраль, в остальные месяцы и в целом за год баланс отрицателен (см. рис. 1). В районах антарктических оазисов (Молодежная, Новолазаревская) и на станции Беллинсгаузен баланс положителен в течение полугода (октябрь—март) и в целом за год. Межгодовая изменчивость

радиационного баланса велика в течение всего года (20–60 %), особенно переходные месяцы, когда месячные суммы баланса близки к нулю.

Проведенный анализ многолетних тенденций изменения исследуемых радиационных характеристик (среднемесячных значений параметров радиационного баланса) за весь период наблюдений на всех станциях показал отсутствие значимых трендов в них (рис. 2-3).

Исключение составили ряды месячных сумм радиационного баланса в декабре на ст. Восток и в октябре–декабре на ст. Молодежная, для которых выявлены значимые отрицательные тренды, а также ряды месячных сумм отраженной радиации в ноябре–декабре на ст. Молодежная с значимыми положительными трендами. Эти тренды объясняются неоднородностью рядов соответствующих характеристик радиационного режима на этих станциях, вызванных либо переносом площадки, либо ее не репрезентативностью за счет задымления при определенных направлениях ветра, и требуют дополнительного анализа.

Более полный анализ климатических характеристик радиационного режима Антарктиды приведен в изданном в рамках данной темы «Справочнике по климату Антарктиды. Солнечная радиация» [9].

Работа выполнена при финансовой поддержке от подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан».

Поступила 14.10.2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русин Н.П. Метеорологический и радиационный режим Антарктиды. —Л.: Гидрометеиздат, 1961. —448 с.
2. Справочник по климату Антарктиды, т. 1. —Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 213 с.
3. Маршунова М.С. Условия формирования и характеристики радиационного климата Антарктиды. —Л.: Гидрометеиздат, 1980. —214 с.
4. Маршунова М. С. Радиационный климат Антарктики. // Метеорологические исследования в Антарктике. —Л.: Гидрометеиздат, 1990. —С. 12–16.
5. Маршунова М. С., Радионов В. Ф. Колебания интегральной прозрачности атмосферы в полярных районах // Метеорология и гидрология, 1988, № 11. —С. 71–80
6. Радионов В. Ф., Маршунова М. С., Русина Е. Н. и др. Аэрозольная мутность атмосферы в полярных областях // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. —1994 —Т. 30. —№6. —С. 797–801.
7. Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям. —Л.: Гидрометеиздат, 1971. —220 с.
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 5. Часть 1. РОСГИДРОМЕТ, М., 1997, —222 с.
9. Справочник по климату Антарктиды. Солнечная радиация. — СПб.: Гидрометеиздат, 2002. —148 с.

*Ф.В.Кашин, В.Н.Арефьев, Ю.И.Баранов, А.В.Кальсин,
Н.Е.Каменоградский, В.П.Устинов, Н.Н.Парамонова,
В.И.Привалов, В.Ф.Радионов*

СОДЕРЖАНИЕ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДЯНОГО ПАРА, УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ АНТАРКТИДЫ И НАД АКВАТОРИЕЙ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

ВВЕДЕНИЕ

Исследования вариаций радиационно-активных, климатообразующих альных газовых составляющих атмосферы и, в первую очередь, содержания парниковых газов: водяного пара (H_2O), углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4) — имеют большое значение в задаче прогнозирования земного климата. Такого рода исследования проводятся на развитой сети международных станций Глобальной службы атмосферы (ГСА), которые расположены преимущественно в районах с условиями, близкими к фоновым.

В настоящее время российские станции, осуществляющие мониторинг содержания в атмосфере парниковых газов, расположены в районах, отверженных воздействию антропогенных источников. И хотя применяемые методики позволяют исключить в значительной степени их влияние на данные наблюдений, целесообразно проведение таких измерений в районах с фоновыми условиями, к которым относится Антарктида.

Экспериментальные исследования изменчивости содержания в атмосфере H_2O , CO_2 , CH_4 , а также окиси углерода (CO) и закиси азота (N_2O) регулярно проводились в Антарктиде, начиная с 23-й САЭ (1977/78 г.) по 32-ю АЭ (1986/87 г.) включительно [1 — 4]. После десятилетнего перерыва они были возобновлены и продолжают в настоящее время. Эти исследования носят комплексный характер и сочетают измерения содержания парниковых газов в столбе атмосферы и их концентрацию (объемную относительную концентрацию) в пробах приземного/приводного слоя воздуха.

В работе представлены результаты измерений содержания H_2O , CO_2 и CH_4 в столбе атмосферы в Антарктиде и концентрации CO_2 и CH_4 в приземном воздухе на станции Новолазаревская ($70^\circ 46'$ ю.ш., $11^\circ 50'$ в.д., 119 м над

уровнем моря), а также концентрации CO_2 и CH_4 в приводном слое воздух в Атлантическом океане на различных широтах по пути следования научно-экспедиционного судна (НЭС) «Академик Федоров» от Антарктиды до Санкт-Петербурга. Измерения проведены в рамках сезонных работ 45-й и 46-й Российских антарктических экспедиций (1999 – 2001 гг.).

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения содержания H_2O , CO_2 и CH_4 в столбе атмосферы осуществлялись спектроскопическим методом по спектрам прошедшего атмосферного солнечного излучения в спектральных диапазонах (4901,25 – 4909,25) см^{-1} (4788,9 – 4906,9) см^{-1} , (2997,5 – 3000,7) см^{-1} соответственно, содержащих полосы поглощения этих газов. Содержание H_2O , CO_2 и CH_4 определялось по величине функции пропускания, зависимость которой от содержания газа для условий измерений (аэрологические данные) рассчитывалась по параметрам тонкой структуры спектров [5, 6]. При задании вертикальных профилей концентрации CO_2 и CH_4 предполагалось, что эти газы равномерно перемешаны по высоте, т.е. их объемные относительные концентрации не изменяются с высотой. При этом содержание CO_2 и CH_4 в столбе атмосферы может быть представлено в виде средней по высоте объемной относительной концентрации, что позволяет сопоставлять результаты измерений в столбе атмосферы с данными измерений в пробах приземного воздуха.

Измерения содержания газов в толще атмосферы осуществлялись помощью спектрометрического комплекса аппаратуры [7]. Погрешности единичного определения содержания H_2O , CO_2 и CH_4 в столбе атмосферы равны соответственно 1,5 %, 0,6 % и 4 % [5, 6].

Концентрации CO_2 и CH_4 в приземном/приводном слое воздуха получены по результатам анализа проб воздуха, отбор которых осуществлялся в предварительно откачанные стеклянные сосуды объемом 2 л в условиях минимального влияния возможных локальных антропогенных источников этих газов. На станции Новолазаревская, расположенной в оазисе Ширмахера, местом отбора проб служила ее восточная окраина, где из-за устойчивых ветров восточных направлений исключалось влияние на состав воздуха в пробе местных производственных источников. С этой же целью на борту НЭС пробы воздуха отбирались в его носовой части. Каждый раз отбиралось по три пробы, две из них использовались для определения концентрации CO_2 , третья – для определения концентрации CH_4 . Пробы воздуха в дальнейшем были проанализированы в Главной геофизической обсерватории (г. Санкт-Петербург). Измерения концентрации CO_2 в пробах воздуха проводились на оптико-акустическом газоанализаторе URAS-2T [8], а концентрации CH_4 – на газохроматографической уст

ановке, созданной на базе хроматографа ЦВЕТ 500М [9]. В качестве эталонов использованы стандартные газовые смеси NOAA. Погрешность измерений концентрации обоих газов составляла 0,2 % [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ H_2O , CO_2 И CH_4 НА СТАНЦИИ НОВОЛАЗАРЕВСКАЯ

Измерения содержания H_2O , CO_2 и CH_4 в столбе атмосферы начались в 45-й РАЭ (январь — март 2000 г.), продолжались в 46-й (ноябрь — декабрь 2001 г., январь — март 2002 г.) и 47-й РАЭ (октябрь — декабрь 2002 г., январь — март 2003 г.) и ведутся в 48-й РАЭ. Ниже приводятся данные о содержании H_2O , CO_2 и CH_4 , полученные по измерениям в 45-й РАЭ.

Водяной пар. На рис. 1 представлены средние за день величины содержаний H_2O в столбе атмосферы в г/см^2 за период с января по март 2000 года на ст. Новолазаревская. В Антарктиде эти месяцы соответствуют середине лета — началу осени.

Как видно из рис. 1, в антарктическое лето содержание H_2O в столбе атмосферы максимальное и составляет в среднем $0,5 \text{ г/см}^2$, а к антарктической осени — уменьшается до $0,2 \text{ г/см}^2$. В целом, характер сезонных изменений содержания H_2O , наблюдаемых в Антарктиде, типичен для этой азовой составляющей атмосферы.

На рис. 1 также представлены величины содержания H_2O в столбе атмосферы, вычисленные по данным аэрологического зондирования. Следует отметить, что аэрологические измерения в январе и первых двух декадах февраля проводились только в «ночное время», а в третьей декаде февраля и в марте «ночные» зондирования дополнялись «дневными» (сопадающими по времени со спектроскопическими измерениями), по которым для этого периода рассчитывались содержания H_2O .

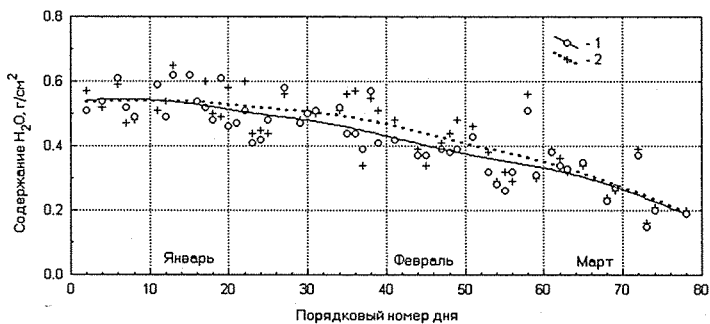


рис. 1. Среднедневные величины содержания H_2O в столбе атмосферы по данным спектроскопических (1) и аэрологических (2) измерений, ст. Новолазаревская

Сравнение результатов двух методов измерения содержания H_2O в столбе атмосферы показывает, что наилучшее согласие в данных наблюдается при совпадении времени спектроскопических измерений и аэрологического зондирования. Для этого периода (конец февраля — март) среднее квадратичное отклонение результатов спектроскопических измерений от данных аэрологического зондирования равно $\pm 0,03 \text{ г/см}^2$, а коэффициент корреляции между ними равен 0,96.

Сплошная и пунктирная линии на рис. 1 — сглаженные данные спектроскопических и аэрологических измерений соответственно, которые представляют средний сезонный ход для периода наблюдений для каждого из набора данных. Сравнение этих кривых показывает, что наилучшее совпадение наблюдается в январе и в конце февраля — марте. Хорошее согласие в январе объясняется тем, что «ночные» и «дневные» профили температуры и давления отличаются незначительно, так как в это время на широте станции Новолазаревская — полярный день. Расхождение в конце января — начале февраля, максимальная величина которого в феврале составляет около $0,05 \text{ г/см}^2$, почти не превышает суммарной погрешности определения содержания H_2O , но имеет систематический характер. Это скорее всего связано с использованием при обработке спектроскопических данных вертикальных распределений температуры и давления, не соответствующих времени измерений.

Углекислый газ. Результаты измерений содержания CO_2 в столбе атмосферы за период январь — март 2000 года в виде средней по высотам объемной относительной концентрации (млн^{-1}) для каждого дня измерений и сглаженные данные (сплошная кривая) приведены на рис. 2.

Сглаженные данные показывают, что концентрации CO_2 за весь период измерений изменяются в пределах $1,5 \text{ млн}^{-1}$. Разброс среднедневных концентраций в январе и в марте в два раза меньше, чем в феврале, что может быть следствием использования при обработке результатов спектроскопических измерений вертикальных профилей температуры и давления, по времени не совпадающих со спектроскопическими измерениями. Этим может объясняться и наблюдающийся минимум концентрации CO_2 в феврале.

На рис. 2 также представлены концентрации CO_2 , полученные по результатам анализа проб приземного воздуха, которые отбирались в одно и то же время со спектроскопическими измерениями (25 января, 6 и 22 февраля, 13 марта 2000 г.) и сглаженная кривая (пунктир) построенный по этим данным. Видно, что концентрации CO_2 в приземном воздухе систематически выше средних для всей толщи атмосферы значений на $1 - 2 \text{ млн}^{-1}$.

Систематические измерения концентрации CO_2 в приземном воздухе в Антарктиде проводятся на ряде станций ГСА [13]. Ближайшими к стан-

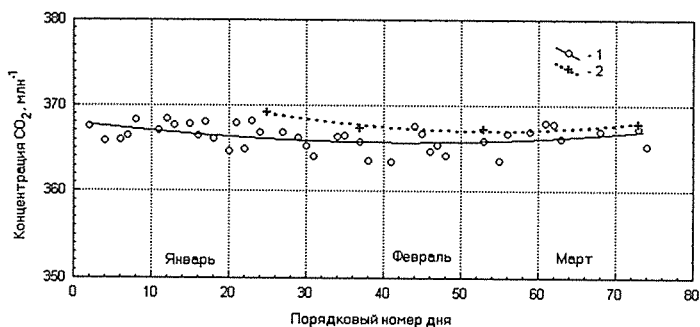


Рис. 2. Концентрации CO_2 :
средние по высоте (1), в пробах приземного воздуха (2)

ии Новолазаревская являются станции ГСА Syowa (69° ю. ш., $39^\circ 35'$ в. д., 1 м над уровнем моря), Halley Bay ($75^\circ 35'$ ю. ш., $25^\circ 30'$ з. д., 10 м над уровнем моря), South Pole ($89^\circ 59'$ ю. ш., $24^\circ 48'$ з. д., 2810 м над уровнем моря). Результаты измерений на этих станциях в виде среднемесячных концентраций CO_2 вместе с величинами среднемесячных концентраций CO_2 для станции Новолазаревская по спектроскопическим измерениям и отбором проб в приземном воздухе приведены в табл. 1.

Данные табл. 1 показывают, что результаты спектроскопических измерений на станции Новолазаревская в январе и марте согласуются с концентрациями CO_2 , полученными на станциях ГСА. Меньшая среднемесячная концентрация CO_2 в феврале может быть связана с использованием недостаточно точных данных о вертикальном распределении температуры и давления, на что уже указывалось выше.

Концентрации CO_2 в приземном воздухе на станции Новолазаревская за весь период измерений всегда больше, чем на других станциях. Это может быть вызвано тем, что станция Новолазаревская расположена на

Таблица 1.

Средние месячные концентрации углекислого газа (млн $^{-1}$)

Станция наблюдений	Метод измерений	Месяцы 2000 г.		
		Январь	Февраль	Март
Новолазаревская	в столбе атм.	$366,7 \pm 0,3$	$365,4 \pm 0,5$	$366,9 \pm 0,3$
Новолазаревская	приз. воздух	$369,1 \pm 0,7$	$367,3 \pm 0,7$	$367,8 \pm 0,7$
Syowa	приз. воздух	366,47	366,23	366,08
Halley Bay	приз. воздух	365,86	365,88	366,04
South Pole	приз. воздух	366,43	366,15	366,00

открытом грунте (являющемся потенциальным источником CO_2), в то время как остальные станции расположены на льду.

Метан. На рис. 3 приведены результаты спектроскопических измерений концентрации CH_4 на ст. Новолазаревская в виде средних за день. Сплошная кривая — результат их сглаживания.

Как видно из рис. 3, в январе-феврале наблюдалось постоянное уменьшение концентрации CH_4 , а в марте концентрация CH_4 оставалась постоянной. За весь период уменьшение концентрации CH_4 составило примерно $0,05 \text{ млн}^{-1}$.

На рис. 3 также представлены результаты измерений концентрации CH_4 в пробах приземного воздуха (12 и 25 января, 6 и 22 февраля, 13 марта 2000 г.). Пунктирная кривая — результат сглаживания этих данных. Результаты измерений концентрации CH_4 в приземном слое систематически превышают на $0,1 \text{ млн}^{-1}$ концентрации в столбе атмосферы. Однако тенденции и величины уменьшения концентрации CH_4 за весь период измерений для этих двух видов измерений совпадают.

Концентрации CH_4 , полученные по измерениям на станции Новолазаревская и ближайших станциях ГСА [13], представлены в таблице 2. Видно, что данные спектроскопических измерений на станции Новолазаревская меньше концентраций CH_4 в приземном воздухе на станциях ГСА. Это может быть связано с уменьшением с высотой концентрации CH_4 из-за его взаимодействия с одним из основных стоков CH_4 в атмосфере — гидроксилом (OH), количество которого увеличивается с высотой.

Концентрации CH_4 в приземном воздухе на станции Новолазаревская для периода измерений оказывались всегда выше, чем на остальных станциях. Это, возможно, также связано с расположением станции Новолазаревская на открытом грунте, который может быть источником метана.

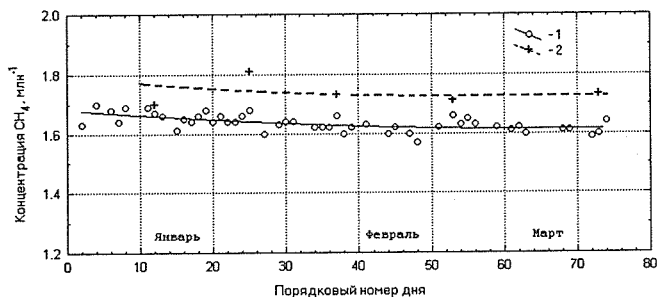


Рис. 3. Концентрации CH_4 : средние по высоте (1), в пробах приземного воздуха (2)

Таблица 2.

Средние месячные концентрации метана (млн^{-1})

Станция наблюдений	Метод измерений	Месяцы 2000 г.		
		Январь	Февраль	Март
Новолазаревская	в столбе атм.	$1,65 \pm 0,03$	$1,61 \pm 0,03$	$1,60 \pm 0,03$
Новолазаревская	приз. воздух	$1,76 \pm 0,01$	$1,72 \pm 0,01$	$1,72 \pm 0,01$
Syowa	приз. воздух	1,69877	1,69140	1,68916
Halley Bay	приз. воздух	1,69827	1,69122	1,68954
South Pole	приз. воздух	1,69876	1,69329	1,69082

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ CO_2 И CH_4 В ПРИВОДНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА В АТЛАНТИКЕ НА РАЗНЫХ ШИРОТАХ

Концентрации CO_2 и CH_4 в приводном слое воздуха в Атлантическом океане определены по результатам анализа проб воздуха, взятых по пути следования НЭС из Санкт-Петербурга в Антарктиду и обратно. В 45-й РАЭ отбор проб воздуха для определения концентрации CO_2 проводился в период с января по май 2000 года в широтной зоне между 57° с. ш. и 65° ю. ш. В 46-й РАЭ отбор проб воздуха для определения концентраций CO_2 и CH_4 производился с апреля по июнь 2001 г. на широтах от 49° с. ш. до 66° ю.ш. (в южном полушарии — с 4 апреля по 20 мая, в северном полушарии — в июне). Для определения основных особенностей широтного хода концентрации использованы данные, полученные только при следовании НЭС из Антарктиды в Санкт-Петербург. Это конец мая — июнь 2001 г.

Результаты измерений концентрации CO_2 на разных широтах в 2000 и 2001 гг., приведены на рис. 4. Здесь же представлены данные, полученные в ходе работ 32-й САЭ (апрель 1987 г.) по пути следования НИС «Профессор Зубов» из Антарктиды в Ленинград [4].

Из рис. 4 видно, что в 1987 и 2000 гг. зависимость концентрации CO_2 от географической широты практически совпадает, так как относится к одному и тому же сезону. В северном полушарии, где больше естественных и антропогенных источников углекислого газа, концентрация CO_2 больше, чем в южном в 1987 г. примерно на 6 млн^{-1} в 2000 г. — на 10 млн^{-1} . Концентрация CO_2 за 13 лет, прошедших между 32-й и 45-й экспедициями, увеличилась примерно на 21 млн^{-1} для южного полушария и на 25 млн^{-1} для северного. Средняя скорость роста концентрации CO_2 в атмосфере для южного полушария составила $1,62 \text{ млн}^{-1}$ в год, для северного — $1,85 \text{ млн}^{-1}$ в год.

Сравнение широтного хода концентрации CO_2 в 2000 и 2001 гг. показывает следующее. В 2001 г. в южном полушарии концентрации CO_2 на $1 - 2 \text{ млн}^{-1}$ больше, чем в 2000 г. Так как в южном полушарии [13] сезонные колебания

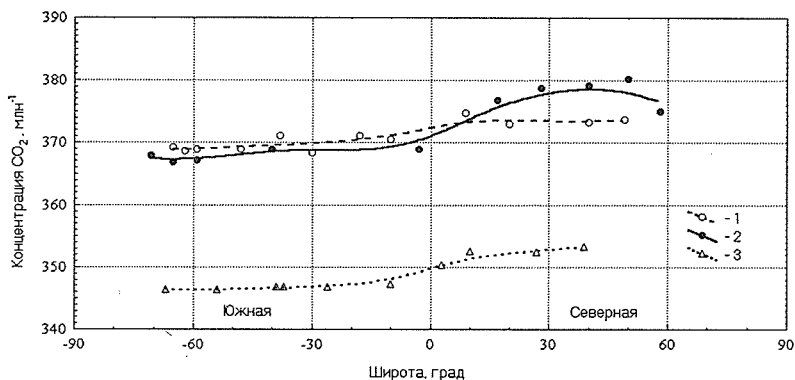


Рис. 4. Распределение концентрации CO_2 по широте:
1 — 2001 г., 2 — 2000 г., 3 — 1987 г.

концентрации CO_2 отсутствует, то это увеличение представляет межгодовой глобальный рост содержания углекислого газа в атмосфере. В северном полушарии концентрации CO_2 в июне 2001 г. меньше на 6 млн^{-1} , чем в апреле 2000 г. Это различие образуется за счет межгодовой изменчивости концентрации CO_2 и особенности ее сезонного хода: в северном полушарии максимальные концентрации наблюдаются весной, а лето — период ее уменьшения.

Широтный ход концентрации метана по измерениям в 2001 г. приведен на рис.5.

В северном полушарии, где находятся основные источники метана, его концентрация больше, чем в южном. На рис. 1 также представлены результаты измерений концентрации CH_4 в районе Атлантического океана на разных широтах в 1992 г. на станциях ГСА и на круизных судах [12].

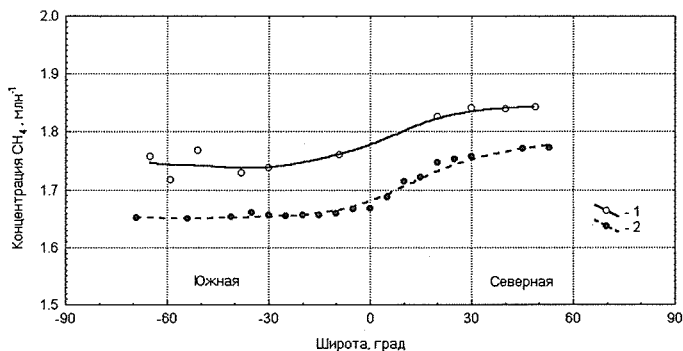


Рис. 5. Распределение концентрации CH_4 по широте: 1 — 2001 г., 2 — [12]

Согласно приведенным на рис. 5 данным, концентрация CH_4 в атмосфере за 10 лет (с 1992 по 2001 г.) увеличилась в южном полушарии примерно на $0,1 \text{ млн}^{-1}$, в северном — на $0,08 \text{ млн}^{-1}$. Средняя скорость роста составила для южного полушария примерно $0,01 \text{ млн}^{-1}$ в год (0,6 %), для северного $0,008$ (0,5 %) млн^{-1} в год. Эта величина близка к оценке скорости глобального увеличения концентрации CH_4 в атмосфере (около 0,6 % в год [11]).

ВЫВОДЫ

По результатам спектроскопических измерений получены величины содержания H_2O , CO_2 и CH_4 в столбе атмосферы, а также измерены концентрации CO_2 и CH_4 в приземном/приводном слое воздуха на станции Новолазаревская в Антарктиде и по пути следования НЭС «Академик Фадеев» из Санкт-Петербурга и обратно в период 45-й и 46-й РАЭ.

Данные спектроскопических и аэрологических измерений содержания водяного пара в столбе атмосферы согласуются в пределах их суммарных погрешностей.

Результаты спектроскопических измерений концентрации CO_2 на станции Новолазаревская согласуются с данными станций мировой сети. Концентрации CO_2 в приземном воздухе на станции Новолазаревская за весь период измерений выше на $1\text{--}2 \text{ млн}^{-1}$, чем по данным спектроскопических измерений на этой же станции и на других станциях ГСА.

Концентрации CH_4 по результатам спектроскопических измерений на станции Новолазаревская ниже, чем в приземном воздухе там же и на остальных станциях ГСА.

По данным измерений с борта НЭС в 2000 г. получено широтное распределение концентрации CO_2 и CH_4 в приводном воздухе. Из сравнения этих данных с результатами таких же измерений, проведенных ранее, получены оценки скоростей накопления содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере.

По данным измерений в 32-й САЭ и в 45-й РАЭ скорость накопления углекислого газа в атмосфере в южном полушарии составляет $1,62 \text{ млн}^{-1}$, в северном полушарии — $1,85 \text{ млн}^{-1}$. Различие скорости накопления CO_2 в разных полушариях, возможно, связано с повышенной интенсивностью выделения углекислого газа в атмосферу в северном полушарии.

По данным измерений в 46-й РАЭ, на станциях ГСА и на круизных судах (1992 г.) скорость накопления CH_4 в атмосфере в южном полушарии составляет примерно $0,01 \text{ млн}^{-1}$ в год, а в северном полушарии $0,008 \text{ млн}^{-1}$ в год соответственно. Эти оценки близки к средней скорости накопления CH_4 в атмосфере по данным станций ГСА.

Работа выполнена при финансовой поддержке от подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан».

Поступила 17.10.2003 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малков И.П., Дианов-Клоков В.И., Лукишин В.В. Измерение широтного распределения концентрации метана в Северном и Южном полушариях // Известия АН Физика атмосферы и океана. —1980. —Т. 16. —№ 7. —С. 763–768.
2. Арефьев В.Н., Каменоградский Н.Е., Устинов В.П., Воскресенский А.И. Спектроскопические измерения углекислого газа в атмосфере Антарктики // Метеорологические исследования в Антарктике. Сборник докладов на II Всесоюзном симпозиуме. —Л.: —Гидрометеиздат, 1986. —Ч. I. —С. 118–124.
3. Воскресенский А.И., Радионов В.Ф., Юрганов Л.Н., Дианов-Клоков В.И. Окись углерода, метан и закись азота в атмосфере Антарктиды // Метеорологические исследования в Антарктике. Сборник докладов на III Всесоюзном симпозиуме. —Л. —Гидрометеиздат, 1990. —Ч. I. —С. 90–93.
4. Баранов Ю.И., Кашин Ф.В., Устинов В.П. Широтное распределение концентрации атмосферного углекислого газа // Труды ИЭМ. —1996. —Вып. 26(161). —С. 100–105.
5. Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В. Спектроскопические измерения содержания метана в атмосфере // Труды ИЭМ. —1995. —Вып. 25(160). —С. 15–25.
6. Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Вишератин К.Н., Каменоградский Н.Е., Семенов В.К., Синяков В.П. Результаты экспериментальных исследований радиационно-активных составляющих атмосферы в центре Евразии // Известия АН. Физика атмосферы и океана. —2000. —Т. 36. —№ 4. —С. 463–492.
7. Арефьев В.Н., Вишератин К.Н., Кашин Ф.В., Устинов В.П. Аппаратура для измерений спектроскопическим методом интегрального содержания газов в атмосфере // Труды ИЭМ. —1994. —Вып. 25(160). —С. 58–64.
8. Броунштейн А.М., Фабер Е.В., Шашков А.А. Газоаналитическая установка для осуществления мониторинга концентрации CO_2 в атмосферном воздухе // Труды ГГО. —1984. —Вып. 472. —С. 11–16.
9. Сметанин Г.Н., Привалов В.И., Решетников А.И., Парамонова Н.И. Газохроматическая установка для прецизионных измерений концентрации метана в атмосфере на фоновом уровне // Труды Филиала ГГО Научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы. Прикладная метеорология. —2000. —Вып. 2 (548). —С. 121–130.
10. Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Решетников А.И. Мониторинг углекислого газа и метана в России // Известия АН. Физика атмосферы и океана. —2001. —Т. 37. —№ 1. —С. 38–43.
11. Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory. № 26. Summary Report 2000–2001 // Eds. King D.B., Schnell R.C., Rosson R.M., and Sweet Ch., Boulder, Colorado Environmental Research Laboratory, March 2002. —184 p.
12. TRENDS'93. A compendium of data on global change. T.A.Boden, D.P.Kaiser R.J.Sepanski and F.W. Stoss, Edits // Carbon Dioxide Inform. Anal. Center, Oak Ridge National Laboratory. 1994. —925 p.
13. WMO WDCGG CD-ROM № 8. // Japan Meteorol. Agen. World Meteorol. Org —March 2002.

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПОБЕРЕЖЬЕ АНТАРКТИДЫ В ГОЛОЦЕНЕ

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с ледяными кернами, содержащими ряды данных о глобальных изменениях климата Южной полярной области в плейстоцене, палеоклиматические записи содержатся также в четвертичных отложениях, которые накапливались на некоторых участках антарктического побережья в оде их дегляциации. Большинство типов этих отложений (морские, ледниковые и водно-ледниковые отложения, отложения в местах долговременного пребывания птиц, и т.д.) распространены далеко не на всех свободных от льда территориях, зачастую маломощны или не содержат материала для определения возрастных характеристик. Их изучение обычно позволяет извлечь лишь весьма разрозненную во временном аспекте и приблизительную в интерпретациях информацию о климатических условиях прошлого. [онные осадки многочисленных водоемов, развивавшихся практически на всех участках антарктического побережья с момента начала дегляциации, апротив, являются архивами накопления непрерывной, достаточно корректной в интерпретациях и, чаще всего, хронологически определимой палеоклиматической информации. Такая информация может не только наиболее полно характеризовать условия окружающей среды на окраине материка в прошлом, но и быть использована для сравнения с реконструкциями, получаемыми при изучении ледяных кернов.

В связи с этим, в течение двух последних десятилетий исследованиям донных осадков водоемов на побережье Антарктиды уделялось довольно большое внимание [2, 3, 4, 7, 8, 16]. Одним из районов, где они велись особенно интенсивно, является оазис Бангера [9, 10, 14, 15] — самая большая свободная от оледенения территория на побережье Восточной Антарктиды (рис. 1, 2). В течение 1986—1994 гг. здесь было отобрано и затем изучено более 40 колонок донных осадков, поднятых из 16 местных озер и внутренних морских заливов (рис. 2). В данной статье мы кратко характеризу-

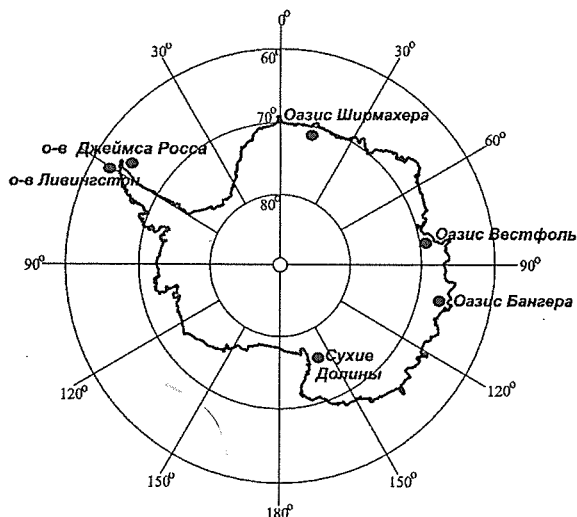


Рис. 1. Местоположение районов изучения донных осадков водоемов на побережье Антарктиды

ем проведенные здесь палеолимнологические работы, излагаем полученные в ходе этих работ палеоклиматические выводы, а также сравниваем эти выводы с результатами изучения донных осадков водоемов в других районах Антарктиды.

ДОННЫЕ ОСАДКИ ВОДОЕМОВ ОАЗИСА БАНГЕРА И ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

Методика исследований. Палеолимнологические работы в оазисе проводились в периоды летних сезонных работ Советской/Российской антарктической экспедиции. Колонки донных осадков отбирались преимущественно со льда, но в одном случае — с плавающей платформы. В ход работ использовались гравитационные трубки ГОИН [1] и Каяк, позволяющие поднимать в практически ненарушенном состоянии верхние 1,0–1,5 м разрезов донных отложений, а в сезоне 1993/94 г. — буровой комплекс австрийского производства UWITEC [11], с помощью которого удалось вскрыть несколько разрезов донных осадков мощностью более 10 м (до морены).

Колонки, отобранные трубкой ГОИН, визуально изучались на местах работ, разделялись на части и, в зависимости от планируемых аналитических исследований, высушивались, замораживались, или же консервировались в парафине. Колонки, поднятые с помощью трубки Каяк и ком

лекса UWITES, большей частью оставлялись в пластиковых пробоот-
орных вкладышах и хранились в специальных контейнерах или помеще-
ниях при нулевой температуре. В случаях, когда осадок был особенно мя-
ж или обводнен (сапропели, водорослевые остатки и т.п.), эти колонки
азбирались в пластиковые бьюксы на образцы длиной около 2-х см и за-
ем также содержались при нулевой температуре. Весь отобранный мате-
иал вывозился на судне и помещался на хранение как в Институте Альф-
еда Вегенера (АВИ, Германия), так и в Арктическом и антарктическом
аучно-исследовательском институте (АНИИ).

Аналитические исследования осадков выполнялись в АВИ, АНИИ и
НИИОкеангеологии. После детального описания внешнего строения ко-
онки разделялись на образцы, которые затем подвергались гранулометри-
ескому, геохимическому, изотопному и диатомовому анализам. Как пра-
ило, образцы для анализов отбирались по всей длине колонок через каж-
ые 2—5 см. В некоторых случаях, когда требовалось получение более де-
ельных данных, интервал отбора осадков из колонок был еще меньше. В
звисимости от количества захороненного в осадках органического мате-
иала, литологических особенностей разрезов и перспективности извлече-
ия палеоинформации из колонок также отбирались образцы для проведе-
ия радиоуглеродного датирования. В общей сложности различным ани-
итическим исследованиям было подвергнуто около 2-х тыс. образцов.

С помощью гранулометрического анализа в осадках определялось про-
ентное соотношение гравийной (>2 мм), песчаной (0,063—2,0 мм) и гли-
истой ($<0,063$ мм) фракций. Учитывая, что большая часть неорганичес-
ого материала могла попасть в водоемы оазиса в результате таяния окру-
ающих ледников и снежников, такое соотношение отражает степень их
даленности, а также климатические условия, которые формировали дина-
ические условия переноса и накопления в водоемах терригенных осадков.

Геохимические и изотопные исследования заключались в определе-
ии процентного содержания в осадках органического углерода (ТОС),
эры (S), нитратов (N) и $\delta^{13}\text{C}_{\text{тоc}}$ (‰ V-PDB). Изменение величин (и соот-
ошения) этих показателей по разрезам соотносится с изменением ряда
акторов осадконакопления (гидродинамические условия водоемов, ле-
овый режим, близость источников органического материала, температу-
а воды и т.д.), что в свою очередь зависело от прошлых изменений кли-
ата, уровня моря и ледникового окружения.

Определение видов диатомовых водорослей в донных осадках и отсле-
ивание вариаций процентного содержания створок видов диатомей по
азрезам были направлены на выявление прошлых изменений состояния
доемов (и, соответственно, окружающей среды), в частности - темпера-

туры и солености воды, гидрологического режима, ледового режима, степени обогащения вод нитратами и фосфатами. Для получения максимальной объективности при интерпретациях в пределах наблюдаемых диатомовых комплексов выделялись так называемые «экологические» группы диатомей, объединяющие виды по одному или двум наиболее важным для них свойствам среды обитания: пресноводные, морские, планктонные, бентосные, открыто-океанические, неритические, ледово-морские и т.п.

Радиоуглеродное датирование осадков проводилось на масс-спектрометре в Исследовательской лаборатории археологии и истории искусств г. Оксфорд (Великобритания) и в Геологической лаборатории г. Ганновер (Германия). Большинство полученных датировок (кроме нескольких образцов и морен) показали голоценовые значения возраста и отсутствие возрастных инверсий, что позволило построить хронологические шкалы осадконакопления. Датировки осадков, формировавшихся в условиях внутренних морских заливов оазиса, были скорректированы на Antarctic Marine Reservoir Effect [12]; величина коррекции составила для разных колонок от -1300 до -205 лет. Полученные значения радиоуглеродного возраста осадков, которые не капливались в пресноводных условиях, не требовали такой коррекции.

Палеоклиматические реконструкции. Все изученные колонки донных отложений водоемов оазиса Бангера содержат информацию об изменениях окружающей среды. Необходимо заметить, однако, что эта информация одновременно включает в себя данные как о региональных/глобальных изменениях (колебания уровня моря, климатические флуктуации) так и об изменениях локальных палеообстановок вокруг каждого из водоемов (наличие ледников, снежников, стока из соседних водоемов, и т.д.). Кроме того, размеры и батиметрия водоемов также влияют на подробность и разнообразие сигналов, архивируемых в их донных осадках. Поэтому для проведения палеоклиматической реконструкции были использованы не все, а наиболее показательные колонки, где осадконакопление контролировалось, прежде всего, изменениями климата, а не другими факторами.

В этом отношении базовой явилась колонка PG1173 из залива Рыбий Хвост (рис. 2). Здесь, в точке с глубиной $90,7$ м, был отобран разрез донных отложений мощностью $12,9$ м, сложенный от донной поверхности до глубины разреза $12,1$ м практически однородным сапропелем, а ниже, до забоя — песчано-суглинистым материалом морены. Детальное радиоуглеродное датирование разреза (21 датировка) показало, что сапропели накапливались здесь в течение всего голоцена практически с постоянной скоростью, и позволило получить корректную хронологию и высокое временное разрешение интерпретаций [9]. Отсутствие в разрезе хронологических и литологических признаков влияния на осадконакопление локальных факто-

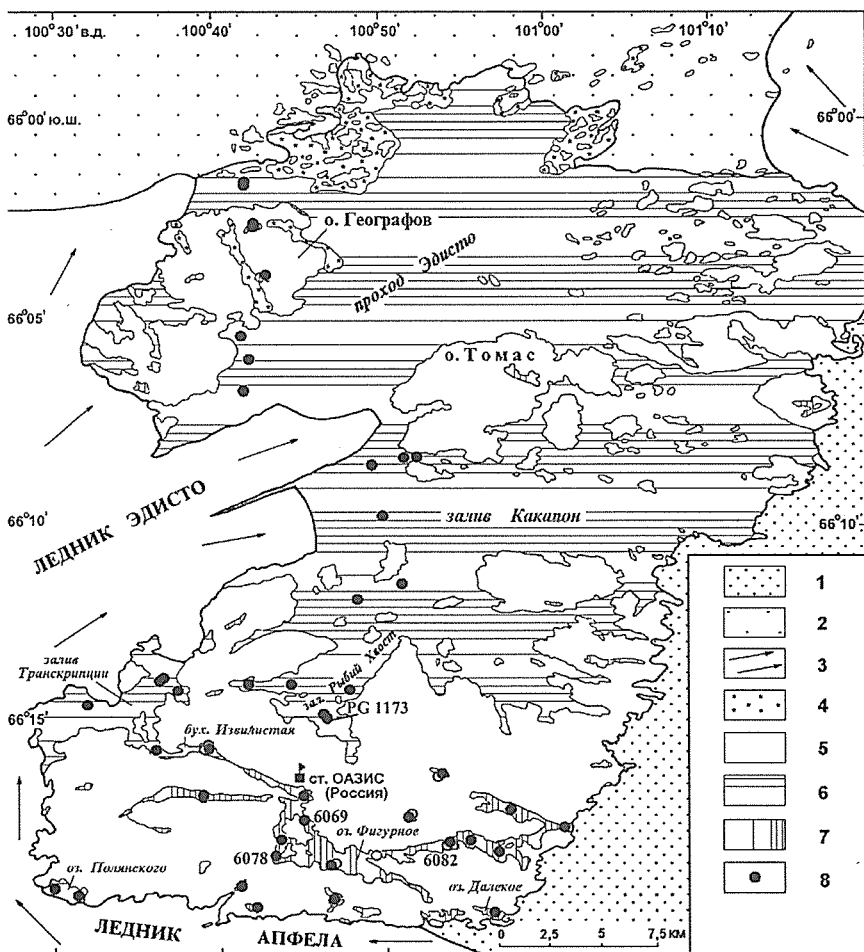


Рис. 2. Оазис Бангера и точки отбора колонок донных осадков.

— ледниковый щит; 2 — шельфовый ледник; 3 — выводные ледники; 4 — большие снежники; — наземные поверхности, свободные от оледенения; 6 — внутренние морские водоемы; 7 — зера; 8 — точки отбора донных осадков водоемов с номерами колонок, указанными в тексте

юв (ледников и т.п.) позволили также считать, что основной причиной изменения исследуемых параметров сапропелей по разрезу являлись изменения климата, воздействовавшие на продуцирование органического вещества в водоеме через изменения температуры воды и ледового режима.

На рис. 3А, Б приведены голоценовые вариации наиболее показательных параметров отложений колонки PG1173: общего содержания органичес-

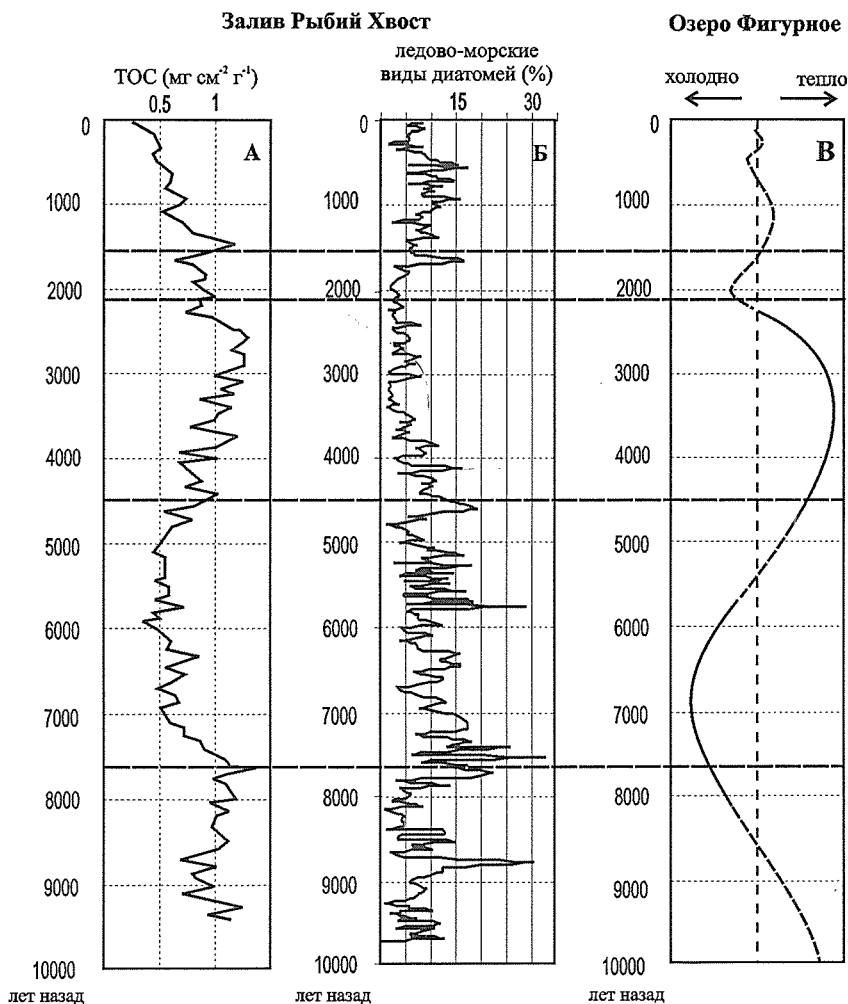


Рис. 3. Палеоклиматические интерпретации результатов исследований колоннок донных осадков водоемов оазиса Бангера.

A – изменения общего содержания органического углерода (ТОС) в осадках колонки PG117 из залива Рыбий Хвост в соответствии с [9]; *B* – изменения содержания группы ледово-морских видов диатомей в диатомовом комплексе колонки PG1173 из залива Рыбий Хвост; *B* – обобщенная палеоклиматическая интерпретация изменения комплекса параметров осадков в колонках 6069, 6078 и 6082 из озера Фигурное в соответствии с [15] (местоположение точек отбора колонок – см. рис. 2)

ого углерода и процентного содержания ледово-морских видов диатомей в иатомовом комплексе. Первый из параметров в большей степени отражает еличину первичной продукции органического вещества в водоеме; увеличение его содержания свидетельствует преимущественно о повышении темпeратуры воды в заливе, и, следовательно, о потеплении. Второй параметр связан, прежде всего, с продолжительностью присутствия в заливе ледового по-рова в течение летних сезонов, поэтому рост его значений указывает на уве-ичение суровости ледовых условий, т.е. на похолодание.

Как видно из рисунка 3А, Б, на фоне многочисленных кратковремен-ых флуктуаций выделяются длительные изменения параметров, совпаающие по времени и регистрирующие однонаправленные климатичес-ие изменения. Уже в самом начале развития залива (от около 9500 до 7700 ет назад) здесь наблюдаются как относительно высокая биопродуктив-ость, так и преимущественно умеренный ледовый режим, что свидетель-твует об относительно теплых климатических условиях этого периода. В садках, накапливавшихся с 7700 до около 4500 лет назад, содержание ле-ово-морских видов диатомей, в целом, достаточно высоко, а содержание рганического углерода имеет постоянно низкие значения, что указывает а существенное похолодание. Напротив, в осадках возраста от 4500 до коло 2000 лет назад регистрируются повышенные значения содержания рганического углерода на фоне резкого снижения присутствия ледово-орских видов диатомей, что говорит о заметном потеплении климата. В ечение периода около 2000—1500 лет назад климатические условия осад-онакопления в заливе, по-видимому, сменились сначала на относитель-о холодные, а затем снова стали относительно теплыми. Это выражается осадках кратковременным снижением содержания органического угле-ода (и ростом присутствия ледово-морских видов диатомей), резко сме-ившимся на непродолжительное уменьшение содержания ледово-морс-их видов и повышение содержания органического углерода. Последние 500 лет осадконакопления в заливе характеризовались преобладанием относительно холодных климатических условий (рис. 3А, Б).

Для проведения палеоклиматических реконструкций были использо-аны также колонки донных отложений 6069, 6078 и 6082, отобранные в амом большом пресноводном водоеме оазиса — озере Фигурном (рис. 2). Юднятые с помощью трубки ГОИН с глубин 56,5 м (6069), 39,0 м (6078) и 7,0 м (6082), они вскрыли разрезы мощностью 101, 119 и 138 см соответ-венно. Несмотря на многочисленные мелкие литологические отличия, все ри разреза имеют общее строение: верхняя их часть представлена преим-ественно водорослевыми остатками с включениями прослоев водных мхов, средней части мощность и число прослоев водных мхов увеличиваются на

фоне уменьшения количества водорослевого материала, нижняя часть (до стигнута в колонках 6069 и 6078) сложена супесчано-суглинистым материалом. Хронология формирования колонок была построена на двенадцати радиоуглеродных датировках, показавших повсеместную непрерывность процесса осадконакопления, начиная с раннего голоцена. Для извлечения корректной информации нами сначала был выполнен сопряженный анализ вариаций всех параметров осадков, а затем проведено сравнение полученных для каждой из колонок палеоклиматических интерпретаций [14, 15]. В итоге было установлено, что наряду с влиянием локальных факторов накопление материала в каждой из колонок (различия в глубинах, ледовом режиме, интенсивности и источниках местного стока, и т.п.), основные изменения условий осадконакопления во всех районах озера были одновременны и связаны, в конечном счете, с наиболее существенными изменениями климата. Ход этих изменений представлен на рисунке 3В.

Совместно анализируя палеоклиматические кривые, построенные на основе изучения колонок из морского залива Рыбий Хвост и пресноводного озера Фигурного (рис. 3), нетрудно заметить достаточно точное совпадение периодов, направленности и амплитуды выявленных изменений климатических условий. На наш взгляд, это свидетельствует, как минимум, о региональном масштабе данных изменений и позволяет сравнивать наши палеоклиматические интерпретации с теми, которые получены для других районов Антарктиды.

ГОЛОЦЕНОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ПОБЕРЕЖЬЕ АНТАРКТИДЫ

Анализ известных палеоолимологических свидетельств изменений климата на побережье Антарктиды в голоцене показывает, что по полноте, детальности и хронологической достоверности ключевым районом в отношении палеоклиматических построений на сегодняшний день является район оазиса Бангера. Это отражено на рис. 4, где наши выводы сравниваются с предварительными данными диатомового анализа донных осадков оазиса Ширмахера, а также с результатами изучения осадков других антарктических водоемов, полученных зарубежными учеными [3, 5, 6, 13]. Заметно, что палеоклиматическими интерпретациями вне оазиса Бангера охвачен лишь средний и поздний голоцен. Также следует подчеркнуть, что хронологические построения в большинстве рассматриваемых случаев либо отсутствуют, либо основаны на небольшом числе радиоуглеродных датировок.

Тем не менее, палеоклиматические кривые, приведенные на рис. обнаруживают черты сходства. Кривая изменения общего количества диатомей в озере Зуб (оазис Ширмахера — см. рис. 1), косвенно свидетельств

ющая о чередовании относительно благоприятных (теплых) и суровых (холодных) условиях осадконакопления, в целом похожа на кривые климатических изменений в районе оазиса Бангера. Общий ход климатических изменений в районах оазиса Вестфоль, Сухих Долин, островов Ливингстон Джеймса Росса также обнаруживает черты сходства с изменениями климата в районе оазиса Бангера, особенно в течение периода от 5 тыс. до 2 тыс. лет назад. Как и в оазисе Бангера, в других районах регистрируются:

- существование относительно холодных климатических условий среднего голоцена до около 4000 лет назад;
- существенное потепление в период времени от около 4 тыс. до 2,5 тыс. лет назад (с максимумом тепла около 3 тыс. лет назад);
- короткое похолодание около 2 тыс. лет назад.

Климатические сигналы в донных осадках, накапливавшихся в течение последних двух тысяч лет в водоемах различных районов побережья Антарктиды, весьма противоречивы (см. рис. 4). Они показывают несовпадение как общего климатического тренда, так и кратковременных климатических флуктуаций в пределах этого периода на разных территориях. С одной стороны, такое несовпадение может означать влияние локальных особенностей реакции природной среды конкретных районов на общие, но кратковременные и малые по амплитуде колебания климата. С другой стороны, недостаточная точность радиоуглеродной хронологии: разница во временном разрешении сравниваемых результатов исследований могут быть причинами искажения истинной картины изменения климата на антарктическом побережье в течение последних двух тысяч лет. В связи с этим, представляется важным проведение дальнейшего сбора здесь любой палеогеографической информации об изменениях природной среды. Это позволит получить более корректную картину принципиального сходства и различий между голоценовыми вариациями климата в прибрежных и во внутренних районах Антарктиды, что, в свою очередь, поможет понять как глобальные, так и локальные механизмы формирования этой палеоклиматической картины.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Мировой океан» (подпрограмма «Изучение исследование Антарктики») и гранта РФФИ 03-05-65295а

Поступила 14.10.2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометеорология. —Л.: Гидрометеоиздат, 1997. —448 с.
2. Bird M.I., Chivas A.R., Radnell C.J., Burton H.R. Sedimentological and stable-isotope evolution of lakes in the Vestfold Hills, Antarctica // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. —1991. —Vol. 84. —P. 109—130.

- Bjorck S., Hakansson H., Olsson S., Barnekow L., Janssens J.* Paleoclimatic studies in south Shetland Islands, Antarctica, based on numerous stratigraphic variables in lake sediments // *J. Paleolim.* —1993. —Vol. 8. —P. 233–272.
- Bjorck S., Hakansson H., Zale R., Karlen W., Jonsson B.L.* A late Holocene lake sediment sequence from Livingston Island, South Shetland Islands, with paleoclimatic implications // *Int. Sci.* —1991. —Vol. 3. —P. 61–72.
- Bjorck S., Olsson S., Ellis-Evans C., Hakansson H., Humlun O., De Lirio J.M.* Late Holocene palaeoclimatic records from lake sediments on James Ross Island, Antarctica // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* —1996. —Vol. 121. —P. 195–220.
- Doran P.T., Wharton R.A., Lyons W.B.* Paleolimnology of McMurdo Dry Valleys, Antarctica // *J. Paleolim.* —1994. —Vol. 10. —P. 85–114.
- Gillieson D.S.* Diatom stratigraphy in Antarctic freshwater lakes // *Quaternary Research in Australian Antarctica: Future Directions.* —Canberra, 1990. —Special Publication 3 (Dep. of Geog. and Oceanog.). —P. 55–67.
- Gillieson D.S.* An environmental history of two freshwater lakes in the Larsemann Hills, Antarctica // *Hydrobiologia.* —1991. —Vol. 214. —P. 327–331.
- Kulbe T., Melles M., Verkulich S., Pushina Z.* East Antarctic climate and environmental variability over the last 9400 years inferred from marine sediments of the Bunge Oasis // *Antarctic and Alpine Research.* —2001. —Vol. 33, № 2. —P. 223–230.
- Melles M., Verkulich S.R., Hermichen W.-D.* Radiocarbon dating of lacustrine and marine sediments from the Bunge Hills, East Antarctica // *Ant. Sci.* —1994. —Vol. 6. —P. 375–378.
- Melles M., Kulbe T., Overduin P.-P., Verkulich S.* The Expedition Bunge Oasis 1993/94 of the AWI Research Unit Potsdam. The Expeditions Norilsk/Taymyr 1993 and Bunge Oasis 1993/94 of the AWI Research Unit Potsdam // *Berichte zur Polarforschung.* —1994. Vol. 148. —P. 27–80.
- Melles M., Kulbe T., Verkulich S.R., Pushina Z.V., Hubberten H.-W.* Late Pleistocene and Holocene environmental history of Bunge Hills, East Antarctica, as revealed by freshwater and epishelf lake sediments // *The Antarctic Region: Geological evolution and processes: Proceedings of the 7th Intern. Symp. on Antarctic Earth Sciences.* (Siena, 1995. Terra Antarctica Publication). —Siena, 1997. —P. 809–820.
- Pickard J., Adamson D.A., Heath C.W.* The evolution of Watts Lake, Vestfold Hills, East Antarctica, from marine inlet to freshwater lake // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* —1986. —Vol. 53. —P. 271–288.
- Verkulich S.R., Melles M.* Composition and paleoenvironmental implications of sediments in a fresh water lake and in marine basins of Bunge Hills, East Antarctica // *Polarforschung.* —1992. —Vol. 60. —P. 169–180.
- Verkulich S.R., Melles M., Hubberten H.-W., Pushina Z.V.* Holocene environmental changes and development of Figurnoye Lake in the southern Bunge Hills, East Antarctica // *Journal of Paleolimnology.* —2002. —Vol. 28. —P. 253–267.
- Yang S., Harwood D.M.* Late Quaternary environmental fluctuations based on diatoms from Yanow Lake, King George Island, Fildes Peninsula, Antarctica // *The Antarctic Region: Geological evolution and processes: Proceedings of the 7th Intern. Symp. on Antarctic Earth Sciences.* (Siena, 1995. Terra Antarctica Publication). —Siena, 1997. —P. 853–859.

А.А.Екайкин, В.Я.Липенков, И.Н.Кузьмин

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И АККУМУЛЯЦИИ СНЕГА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АНТАРКТИДЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗОТОПНЫХ И СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СНЕЖНОЙ ТОЛЩИ В ШУРФАХ НА СТАНЦИИ ВОСТОК

ВВЕДЕНИЕ

Изучение ледяных кернов, полученных при бурении глубоких скважин в районе российской антарктической станции Восток, привело к целому ряду важнейших климатических открытий и позволило детально охарактеризовать изменения климата Земли за последние 420 тыс. лет [15, 48]. Одним из основных направлений этих палеоклиматических исследований является изучение изотопного состава ледяных кернов, который отражает температурные условия формирования твердых атмосферных осадков, отложенных на поверхности ледникового покрова в далеком прошлом.

Новые данные [16, 27, 38, 50], опубликованные за последние годы показали необходимость пересмотра палеотемпературной интерпретации профилей изотопного состава ледяных кернов из глубоких скважин, пробуренных в Гренландии и Антарктиде и, в том числе, — на станции Восток. В частности, была поставлена под сомнение корректность использования современных пространственных связей между изотопным составом снега и приземной температурой воздуха для оценки прошлых изменений этой температуры по вариациям изотопного состава льда в глубоких ледяных кернах. Необходимым звеном в разработке данной проблемы является целенаправленное изучение атмосферных процессов, контролирующего изотопный состав осадков, с целью выявления истинной природы наблюдаемых корреляционных связей.

Исследование, результаты которого приведены в данной статье, выполнялось в рамках проекта 6 «Исследовать изменения климата и окр.

кающей среды по данным изучения ледяных кернов из глубоких скважин и донных отложений водоемов антарктических оазисов и окраинных морей Антарктиды. Провести микробиологические исследования глубоких горизонтов ледникового покрова» подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан» и включало следующие основные компоненты:

- проведение полевых исследований пространственной и временной изменчивости изотопного состава и скорости накопления снега в районе станции Восток;

- установление основных факторов, оказывающих влияние на формирование изотопного состава осадков в центральной Антарктиде;

- изучение метеорологических условий, при которых происходило формирование осадков и закрепление снега в районе станции Восток в течение последних 40 лет;

- изучение процессов переотложения снега и их влияния на пространственную и временную (при наблюдении в одной точке) изменчивость аккумуляции и изотопного состава отложенного снега;

- совершенствование на основе вновь полученных данных методических подходов к палеоклиматической интерпретации результатов изотопных и геохимических исследований в шурфах;

- реконструкция температуры и скорости накопления снега в районе станции Восток за последние 200 лет по результатам детальных исследований снежной толщи в глубоких (10–12 м) шурфах.

ФАКТОРЫ, КОНТРОЛИРУЮЩИЕ ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА СНЕЖНОЙ ТОЛЩИ

В основе связи изотопного состава атмосферных осадков с температурой их формирования лежит явление т.н. изотопного истощения влаги в воздушной массе, несущей осадки, обусловленное фракционированием изотопов при фазовых переходах. Ввиду того, что упругость насыщения водяного пара, состоящего из молекул тяжелых изотопов (HD^{16}O или H_2^{18}O), меньше, чем упругость насыщения пара, состоящего из легких молекул, концентрация тяжелых изотопов в жидкости больше, чем в находящемся в равновесии с ней водяном паре. В связи с этим, изотопный состав δ (см. уравнение (2)) водяного пара, содержащегося в воздушной массе, которая сформировалась над поверхностью мирового океана, будет отрицательным (рис. 1). При охлаждении воздушной массы происходит конденсация влаги, и вновь сформировавшиеся осадки оказываются обогащенными тяжелыми изотопами по сравнению с водяным паром, оставшимся в воздушной массе, что приводит к еще большему уменьшению изотопного состава последнего. Очевидно, что при дальнейшем ох-

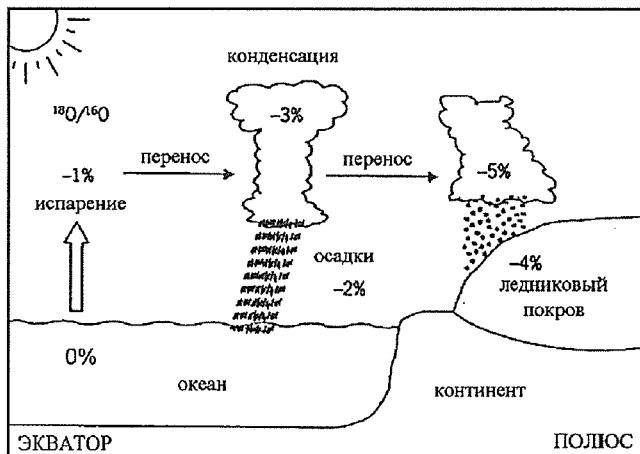


Рис. 1. Круговорот воды в природе и изотопное фракционирование (по данным [40])

лаждении воздушной массы как она сама, так и новые порции конденсата будут содержать все меньше и меньше тяжелых изотопов за счет их последовательного вымывания в ходе образования и выпадения осадков.

Изотопный состав осадков в любой момент времени, таким образом в первую очередь определяется отношением F количества влаги, оставшейся в воздушной массе на момент выпадения данного осадка, к начальному количеству влаги. В свою очередь, F зависит от разности температур конденсации на данный момент и на момент выпадения первой порции осадков. Изотопный состав жидких осадков ($\delta_{ж}$) хорошо описывается уравнением релеевского типа, основанном на предположении, что конденсация влаги происходит в равновесных условиях и каждая новая порция жидкости сразу удаляется из воздушной массы [29]:

$$\delta_{ж} = \alpha / \alpha_0 \cdot F^{\alpha m - 1} - 1, \quad (1)$$

где δ (δD либо $\delta^{18}O$) — изотопный состав, представляющий собой отношение массовой концентрации тяжелого изотопа в образце к его концентрации в стандарте, выраженное в промилле:

$$\delta = (R_{обр} - R_{см}) / R_{см} \times 1000, \quad (2)$$

R — массовая концентрация $[^2H^1H^{16}O]/[^1H_2^{16}O]$ или $[H_2^{18}O]/[^1H_2^{16}O]$ соответственно, α — коэффициент фракционирования в рассчитываемый момент времени: α_0 — в начале процесса конденсации, αm — среднее значение коэффициента в процессе конденсации. «Простые» изотопные модели релеевского типа вполне удовлетворительно объясняют современ-

ное географическое распределение изотопного состава поверхностного лоя снега в Антарктиде и Гренландии [25, 39, 42, 46]. Это послужило основанием для широкого использования современной пространственной линейной зависимости изотопного состава снега δ от средней годовой температуры воздуха T_s (обычно оцениваемой по температуре фирна на глубине 10 м) для палеоклиматической интерпретации изотопных профилей ю глубоким ледяным кернам и, в частности, для керна со станции Восток 48]. Однако, независимые данные о прошлых изменениях температуры предполагают, что указанный «классический» изотопный метод недооценивает амплитуду прошлых изменений температуры (см. обзоры в [31, 41, 3]). В частности, анализ скважинных термограмм показал, что изотопный метод занижает амплитуду изменения температуры при переходе от максимума последнего оледенения (МПО) к голоцену в Гренландии в 2 аза [27, 38], а в Антарктиде — приблизительно на 30 % [16, 50]. Исследования, проведенные в последние годы, позволили выявить целый ряд факторов, которые, как полагают, могут существенно затруднять палеотемпературную интерпретацию изотопных профилей, измеренных по ледяным кернам. Наиболее важными из них являются: 1) изменения в прошлом метеорологических условий испарения водяного пара в источнике влаги [22, 28, 54]; 2) изменение внутригодового хода выпадения осадков [51, 56]; 3) изменение микрофизических условий образования осадков [35]; 4) различие амплитуды изменения температуры воздуха на уровне конденсации T_c и у поверхности ледника T_s [31, 42, 50]; 5) пост-депозиционное изменение первоначального изотопного состава осадков [7, 55].

Вместе с тем, целый ряд экспериментальных данных и результатов моделирования с использованием моделей общей циркуляции атмосферы (GCMs) показывают, что разница между пространственным и временным коэффициентами $C = \Delta\delta/\Delta T_s$ (где Δ обозначает разность между значениями данного параметра в прошлом и в настоящее время) лежит в пределах 30 % (см. обзор в [31, 41, 43]). Это позволило некоторым исследователям утверждать, что современный пространственный коэффициент C в пределах неопределенности наших знаний равен соответствующему временному коэффициенту и может быть использован вместо него [41, 43]. Не исключено, что перечисленные выше факторы взаимно компенсируют друг друга, случайным образом приводя к равенству указанных коэффициентов. Для окончательного решения этого вопроса необходимы дополнительные исследования.

Настоящая работа посвящена определению температуры конденсации в районе станции Восток, изучению влияния ветрового перераспределения снега на формирование изотопных профилей снежной толщи, а

также возможного влияния условий в источнике влаги на сезонный и меж-
годовой ход изотопного состава осадков. Влиянием указанных выше фак-
торов 2 и 3 (сезонность осадков и микрофизические условия их формиро-
вания), по-видимому, можно пренебречь в интересующих нас масштаба
времени. Также в работе не обсуждаются пост-депозиционные изменени-
изотопного состава снега, поскольку до сих пор не существует модели
способной количественно оценить указанные изменения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Основу экспериментальной базы настоящего исследования состав-
ляют данные, собранные авторами на станции Восток в период с 1980 по
2001 г. Ниже приведен краткий обзор использованных данных, а также
описание методов полевых и лабораторных исследований.

Полевые работы. Все снежные разрезы, обсуждаемые в настоящей раб-
те, были датированы на основании результатов стратиграфических наблюде-
ний с учетом вероятности пропуска годовых слоев в районе ст. Восток (рис. 2
[9] по методике, разработанной одним из авторов (В.Л.) [44]. Полученны-
таким образом первичные датировки были затем скорректированы с испол-
зованием данных о глубине залегания трех реперных горизонтов: двух слое-
повышенной радиоактивности 1955 и 1965 гг. и слоя повышенной электр-

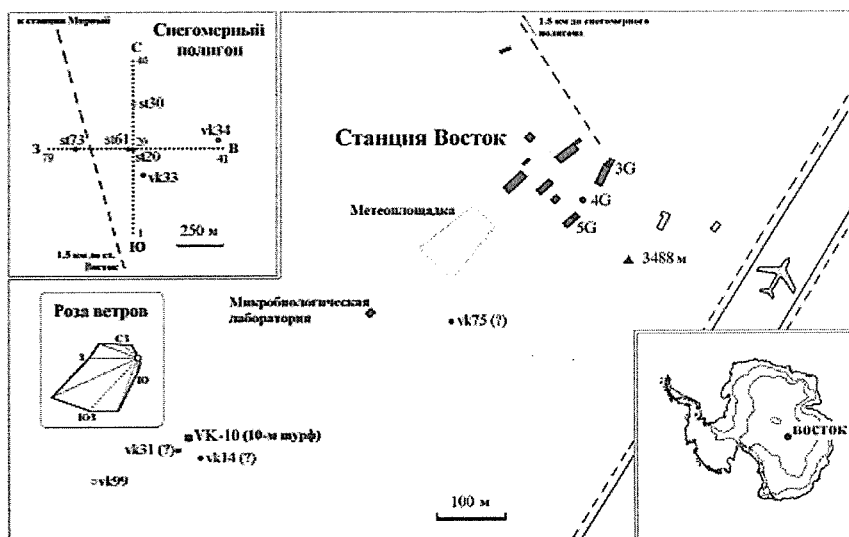


Рис. 2. Схема окрестностей станции Восток с расположением снежных шурфов

проводности снега 1816 г., содержащего продукты извержения вулкана Таиборы. Для реконструкции значений годовой аккумуляции снега по данным толщине годовых слоев был использован сводный экспериментальный профиль плотности снежной толщи в районе станции Восток [11].

Отбор проб на изотопный состав, бета-радиоактивность и электропроводность снега проводился с использованием специальных методик оборудования, что исключало контаминацию образцов и изменение изотопного состава [31]. С этой же целью транспортировка и хранение образцов вплоть до их лабораторного анализа осуществлялись при отрицательной температуре (около -15°C). Профили изотопного состава, общей бета-радиоактивности и электропроводности снега, полученные из шурфов *vk99* и *st30*, показаны на рис. 3.

Для отбора проб снежных осадков и переметенного снега на расстоянии порядка 30 м с наветренной стороны от станции Восток были установлены две ловушки — одна на уровне земли для переметенного снега, другая на высоте около 1,5 м для сбора снежных осадков. После каждого снегопада ловушки проверялись, и, в случае обнаружения в них снега производился отбор пробы. Образцы собирались в специальные герметичные контейнеры, которые хранились в холодном помещении вплоть до их вывоза со станции. В дальнейшем с этими образцами поступали так же, как и с изотопными пробами из шурфов.

В декабре 1999 г. нами была проведена съемка высоты снежной поверхности возле каждой из вех старого и нового снегомерных полигонов с целью выявления связи между рельефом снежной поверхности и пространственной изменчивостью скорости накопления и изотопного состава снега. Перед началом измерений были определены систематическая и случайная погрешности наблюдений и сделан вывод о том, что точность измерений удовлетворительна для целей наших исследований.

Лабораторные измерения. Все изотопные измерения, проведенные в рамках настоящего исследования, были выполнены в Лаборатории изучения климата и окружающей среды, г. Сакле, Франция (дейтерий и килород 18), и Отделе геофизики Института Нильса Бора университета Копенгагена, Дания (кислород 18) одним из авторов (А.Е.). Методика масс-спектрометрических исследований подробно изложена в [6, 31]. Случайная ошибка измерений в большинстве случаев находилась в пределах 0,6–0,8 ‰ для δD и 0,04–0,06 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$, при систематической погрешности не превышающей 1,3 и 0,11 ‰, что вполне удовлетворительно для целей настоящего исследования.

Измерения общей β -радиоактивности образцов снега были выполнены в Лаборатории гляциологии и геофизики окружающей среды (ЛГГОС

Гренобль (Франция), с использованием стандартной методики, описанной в [49].

Измерение электропроводности образцов снега было проведено в ГГОС. С целью избежать загрязнения образцов, измерения выполнялись химической лаборатории в стерильных комнатах с использованием специальной защитной одежды. Перед началом работы образцы плавились и агревались до комнатной температуры, а затем электропроводность талой воды измерялась с помощью кондуктометра CD78 фирмы TACUSSEL®.

Экспериментальные данные. Опорными данными для изучения пространственно-временной изменчивости снегонакопления послужили результаты снегомерных наблюдений на речном полигоне станции Восток, становавшем в 1970 г. [4, 5, 9]. В ходе полевых работ, проведенных нами на станции Восток в рамках настоящего исследования, были получены данные по аккумуляции в двух 3-метровых (*st61* и *st73*) и двух 12-метровых (*vk99* и *st30*) шурфах. Накопление снега еще в четырех шурфах было рассчитано на основании результатов наблюдений, проведенных в снежных шурфах французскими и российскими гляциологами в 1984 г. (*vk14*) и 1998 г. (*vk31*, *vk33* и *vk34*). Кроме того, использованы данные из 10-метрового шурфа *vk10*, вскрытого одним из авторов (В.Л.) в окрестностях станции в 1980 г. Расположение шурфов показано на рис. 2.

Данные об изотопном составе снега включают результаты масс-спектрометрических измерений по образцам, отобраным в вышеупомянутых восьми шурфах (кроме *vk10*). Кроме того, в январе 2000 г. возле каждой из секций снегомерного полигона были отобраны образцы снега глубиной 10 см целью изучения пространственной изменчивости изотопного состава снега. Банк данных изотопного состава был также пополнен более чем сотней проб снежных осадков и переметенного снега, отобранных в период с декабря 1999 по декабрь 2000 г. одним из авторов (А.Е.), а также метеорологом станции Восток В.А.Перским с целью изучения внутригодовой изменчивости их изотопного состава.

Метеорологические данные, использованные в данном исследовании, включают средние декадные, месячные и годовые значения температуры воздуха и поверхности снега, скорости и направления ветра, давления воздуха, влажности, количества осадков, а также данные наблюдений за облачностью и атмосферными явлениями за период с декабря 1957 г. Источником послужили Справочник по климату Антарктиды [17], а также фоновые материалы (таблицы метеорологических наблюдений ТМ-1), хранящиеся в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ). В настоящее время, средние месячные значения основных метеорологических характеристик для станции Восток и других

антарктических станций доступны на официальном сайте ААНИИ (http://www.aari.nw.ru/projects/Antarctic/default_en.asp).

Для выполнения настоящего исследования нами была сделана выборка данных аэрологических наблюдений на изобарических поверхностях 600, 500 и 400 мб, а также в особых точках по температуре (границ приземных инверсий и изотермии) за период 1958–1991 гг. Банк данных включает в себя результаты срочных наблюдений (температура, давление, влажность воздуха и ветра, а также высота нижней границы облачности по которым в дальнейшем были рассчитаны средние декадные, месячные и годовые значения. Источником послужили фондовые материалы из архивов ААНИИ (таблицы аэрологических наблюдений ТАЭ-7 за период 1960–1963 гг. и ТАЭ-16 за период 1964–1991 гг.), а также опубликованные данные за 1958 г. [18] и за 1959 г. [19]. Кроме того, средние месячные данные основных метеоэлементов за первые годы работы станции опубликованы в Аэрологическом справочнике Антарктиды [3]. В результате изучения статистической однородности рядов средних годовых значений аэрологических данных мы пришли к выводу о необходимости отбраковки результатов наблюдений за период 1958–1961 гг. [31] вследствие существенных систематических погрешностей в данных о температуре [12, 13].

ТЕМПЕРАТУРА КОНДЕНСАЦИИ ОСАДКОВ

Температура конденсации изучалась с помощью данных аэрологических наблюдений отдельно для каждого из двух главных типов осадков, характерных для центральной Антарктиды — осадков из облаков и т.н. осадков из «ясного неба» (ледяных игл) [1].

Прежде всего, была предпринята попытка оценить долю каждого из этих двух типов осадков, используя данные о месячных суммах накопления снега на снегомерном полигоне станции Восток (1970–1995 гг.). Для этого были рассчитаны средние месячные значения накопления снега отдельно для месяцев, в которые наблюдались осадки из облаков и для тех, в которых наблюдались только ледяные иглы. Кроме того, значения накопления в ледяные месяцы были скорректированы на испарение снега [1, 2], чтобы получить значения количества осадков. Полученное внутригодовое распределение количества обоих типов осадков представлено на рис. 4. В целом за год около 3/4 (между 61 и 89 % с вероятностью попадания в данный интервал: 95 %) общей суммы осадков на станции Восток дают ледяные иглы, и лишь около 1/4 — осадки из облаков. Вследствие больших относительных ошибок полученных месячных величин мы не рассматриваем сезонный ход каждого из типов осадков. Тем не менее, привлекает внимание тенденция уменьшения количества осадков из ясного неба в летние месяцы (декабрь и я.

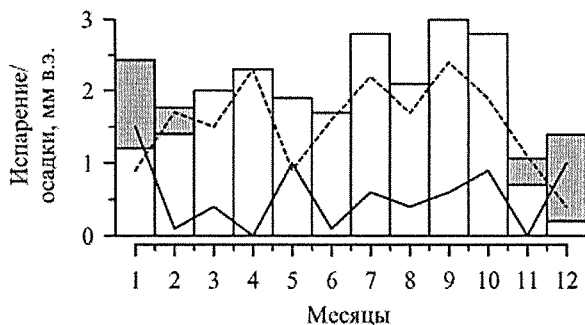


Рис. 4. Внутригодовой ход количества осадков на станции Восток, включая осадки из ясного неба (пунктирная линия) и облаков (сплошная линия). Заштрихованные области обозначают количество влаги, испаряющейся в летний период.

варь), вероятно, вследствие ослабления инверсии и нисходящих токов воздуха в атмосфере над Антарктидой [1].

Столь малый вклад осадков из облаков объясняется, с одной стороны, редкой повторяемостью осадков (в среднем 37 дней с осадками в год, согласно метеоданным за период 1963–2001 гг.), а также малой интенсивностью осадков, благодаря чему наблюдатели даже часто путают осадки из облаков с ледяными иглами [1, 20].

В случае осадков из ясного неба уровень (точнее — слой) конденсации совпадает с квази-изотермическим слоем вблизи верхней границы приземной инверсии [1, 20, 23]. В качестве наилучшей оценки температуры конденсации для ледяных игл в этом случае является температура этого изотермического слоя, равная, согласно аэрологическим данным за период 1963–1991 гг., $-39,1 \pm 0,8$ °C (здесь $\pm 0,8$ °C — многолетняя изменчивость (1σ) температуры) (рис. 5).

В качестве уровня конденсации осадков из облаков в первом приближении была взята высота нижней границы облаков, доступная из аэрологических данных. Средние многолетние значения температуры на нижней границе облаков нижнего и среднего уровня равны, соответственно, -36 и -42 °C. Эти две величины задают две крайние оценки для средней взвешенной температуры конденсации облачных осадков, равной, таким образом, -39 ± 3 °C.

Наиболее вероятное значение средней годовой температуры конденсации для обоих типов осадков составляет -39 °C с неопределенностью $\pm 1,6$ °C. Эта величина в пределах погрешности своего значения соответствует температуре на верхней границе приземной инверсии $T_i (-38,0 \pm 0,6$ °C), что

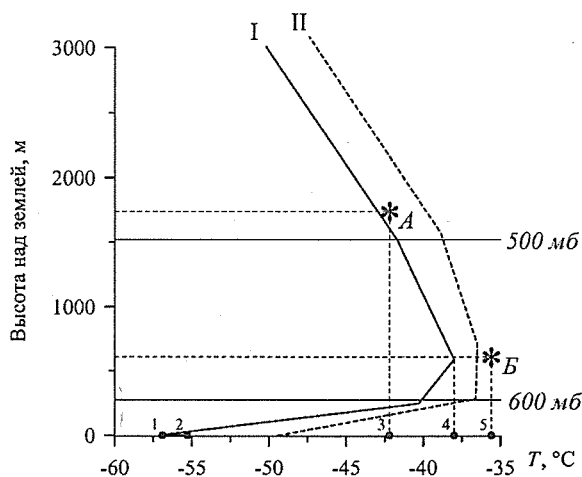


Рис. 5. Средний многолетний (1963–1991 гг.) вертикальный профиль температуры в районе станции Восток по данным аэрологических наблюдений (I) и средний многолетний профиль температуры в дни с осадками из облаков (II). А и Б — высота и температура нижней границы среднего и нижнего ярусов облачности. Цифры соответствуют средним многолетним значениям температур: 1 — на нижней границе приземной инверсии; 2 — приземного (на высоте 2 м) воздуха; 3 — на нижней границе облаков среднего яруса; 4 — на верхней границе приземной инверсии; 5 — на нижней границе облаков нижнего яруса. Также на рисунке показано среднее положение изобарических поверхностей 500 и 600 мб

позволяет использовать последнюю в качестве наилучшей оценки температуры конденсации осадков T_c для района станции Восток.

Кривой II на рис. 5 показан средний профиль температуры во время выпадения осадков из облаков. Как и следовало ожидать [1], температура во время выпадения осадков на всех уровнях выше своих средних годовых значений. Однако, эта разница не постоянна по высоте: от 6 °C у поверхности ледника она уменьшается до своего минимума в 1,5 °C на верхней границе слоя инверсии, вновь увеличиваясь в свободной атмосфере приблизительно до 3 °C. Это свидетельствует о существенном ослаблении интенсивности приземной инверсии, обусловленной отепляющим воздействием облаков, которые препятствуют радиационному выхолаживанию поверхности.

В целом, мы полагаем, что средняя годовая температура конденсации для района станции Восток, взвешенная по количеству осадков, несущественно отличается от своего простого среднего годового значения, учиты-

ая относительно равномерный сезонный ход количества осадков (рис. 4) и принимая во внимание доминирующую роль осадков из «ясного неба».

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА СНЕГА

Целым рядом исследований [21, 37, 53, 57] было показано, что крупные снежные дюны (т.н. «мега-дюны»), наблюдающиеся повсеместно на поверхности антарктического ледникового покрова, ответственны за формирование квазипериодических пространственных колебаний аккумуляции снега с длиной волны от 2 до 40 км. Перемещение этих дюн под действием ветра вызывает временные вариации снегонакопления при наблюдении в отдельной точке, причем период этих вариаций связан с размерами дюн через скорость их перемещения. Поскольку указанная скорость оценивается величиной порядка $20\text{--}25 \text{ м год}^{-1}$ [21, 57], ожидаемый период временных вариаций равен от нескольких сотен до первых тысяч лет.

Достаточно хорошо изучено влияние микрорельефа снежной поверхности на межгодовую изменчивость скорости накопления снега (см., например, [14]). Оно заключается, в основном, в увеличении доли «стратиграфического шума» в рядах аккумуляции, полученных в отдельных точках [9, 36].

Исследование пространственной и временной изменчивости аккумуляции снега на речном полигоне станции Восток [9] привело к выводу существовании целого спектра пространственных вариаций снегонакопления с горизонтальным масштабом до 350 м. Результаты нивелирной съемки подтвердили, что указанные волны накопления связаны с периодическими неоднородностями рельефа снежной поверхности [32], которым было дано название «мезо-дюны» [31] благодаря тому, что они занимают промежуточное положение между микрорельефом и мега-дюнами.становлено, что перемещение этих дюн в результате деятельности ветра приводит к формированию временных колебаний снегонакопления при наблюдении в отдельно взятой точке с периодом около 2–3, 5 и 20 лет.

Рассмотрим возможное влияние мезо-дюн на пространственную и временную изменчивость изотопного состава снега.

В январе 2000 г. возле каждой из вех профиля СЮ снегомерного полигона были отобраны образцы поверхностного 10-см слоя снега. Результаты измерения их изотопного состава сопоставлены на рис. 6 с приростом снега за два года (1998–1999 гг.) на тех же вехах (см. кривые б и в). Главной особенностью обоих профилей является их отчетливая отрицательная корреляция ($r = -0,68$). Это означает, что не только скорость аккумуляции снега, но и его изотопный состав (а, возможно, и другие химические и физические свойства снега) могут быть подвержены простран-

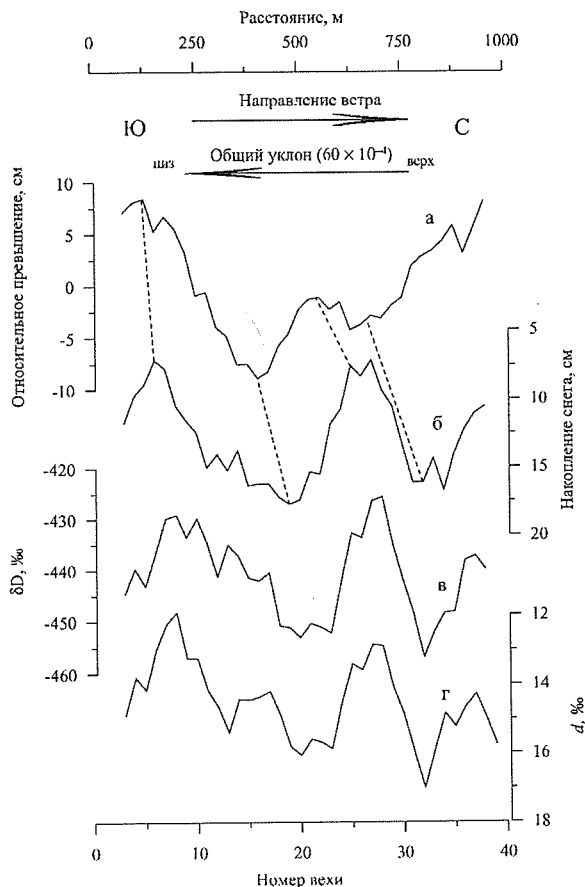


Рис. 6. Пространственная изменчивость высоты снежной поверхности, накопления и изотопного состава снега вдоль профиля СЮ снегомерного полигона.

а — профиль поверхности, измеренный в декабре 1999 г.; *б* — прирост снега за два года (1998–1999 гг.); *в* и *г* — профили средних значений δD и d в верхних 10 см снежной толщи. Все профили сглажены с периодом 125 м. Из профиля высоты снежной поверхности (*а*) удален тренд.

ственному перераспределению, связанному с существованием неровностей рельефа снежной поверхности. Поскольку годовое накопление снега в районе Востока (около 7 см снега в год) мало по сравнению с типично высотой микрорельефа (около 15–20 см), пространственное распределение осадков, выпавших в данном году, является дискретным, неоднородным.

ым. Это в еще большей степени справедливо для осадков, сформировавшихся в отдельно взятый сезон года. Это означает, что в любой момент времени на поверхности ледника может быть обнаружен снег, выпавший в различные сезоны года или даже в различные годы. Поскольку свойства нежных осадков, выпадающих в разные сезоны и при разных погодных условиях, различаются, можно ожидать, что интенсивность пространственного перераспределения «летнего» и «зимнего» снега также будет различаться. В частности, вследствие того, что снежинки зимнего снега меньше, чем летнего, а скорость ветра зимой выше [1], можно ожидать, что зимний снег более подвержен ветровому перераспределению, чем летний снег. Если это так, то зимний снег должен преимущественно накапливаться в местоположениях с меньшей скоростью ветра (например, за снежными барьерами или там, где наклон поверхности меньше). Поскольку в таких местоположениях также наблюдается повышенное накопление снега, описанный механизм должен приводить к отрицательной корреляции между пространственным распределением аккумуляции и δ снега.

Дополнительным подтверждением предложенного механизма неравномерного пространственного перераспределения снега, выпавшего в разные сезоны года, служит наблюдаемая сильная отрицательная корреляция между профилями δD и эксцесса дейтерия d (рис. 6 в и г), если принять во внимание, что сезонные ходы d и δD в на станции Восток противоположны (см. следующий раздел).

Другим возможным объяснением наблюдающейся зависимости между δ и a является тот факт, что в точках с относительно малой скоростью накопления любой годовой слой дольше находится вблизи поверхности, где наиболее интенсивно выражены процессы метаморфизма. В результате, изотопный состав этого снега будет более обогащен тяжелыми изотопами по сравнению со снегом, отложившимся в точках с относительно быстрой скоростью накопления [55]. Отрицательная корреляция между D и d (рис. 6 в и г) не противоречит этому предположению, если учесть, что изотопный обмен между снегом и водяным паром воздуха проходит в равновесных условиях.

Поскольку пространственные аномалии изотопного состава (рис. 6в) связаны с соответствующими волнами накопления (рис. 6б) и неровностями снежной поверхности (мезо-дюнами) (рис. 6а), то можно предполагать, что указанные аномалии перемещаются вслед за волнами накопления в результате деятельности ветра и, следовательно, создают соответствующие временные колебания изотопного состава снега в отдельно взятой точке. Действительно, спектральный анализ рядов изотопного состава снега выявил «рельефо-обусловленные» колебания с периодами 2–3, 5

и около 20 лет [31]. Кроме них, обнаружены также вариации с периодами около 10 и 50 лет, которые, по-видимому, обусловлены климатической изменчивостью в данном районе Антарктиды.

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА СНЕЖНЫХ ОСАДКОВ

На рис. 7 показаны средние месячные значения изотопного состава образцов осадков, отобранных на станции Восток в период с декабря 1995 по декабрь 2000 г. Значения δD меняются от минимума в августе (-493‰ до максимума в январе (-405‰ ; значение декабря 2000 г., равное -401‰ , основано на измерении лишь одного образца и потому не надежно) с средним годовым, равным -453‰ . Таким образом, годовая амплитуда δ равна почти 90‰ , а внутригодовой ход изотопного состава следует годовому ходу температуры воздуха, также показанному на рис. 7.

Соответствующий годовой размах значений $\delta^{18}\text{O}$ составляет $13,8\text{‰}$, что почти вдвое превышает значение, полученное Гордиенко с соавторами (1976) для образцов осадков, собранных в 1970 г. ($7,5\text{‰}$) [8]. Столь большая разница не может объясняться различными метеорологическими условиями в 1970 и 2000 гг. Вероятно, заниженная амплитуда δ в 1970 г. может быть обусловлена загрязнением образцов осадков переметенным снегом, хотя прямых свидетельств этому нет. Действительно, размах значений изотопного состава переметенного снега ($9,4\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$) в 2000 г. существенно ниже, чем для осадков (рис. 7). Это свидетельствует о том, что переметенный снег является смесью осадков, выпавших в различные сезоны.

Также на рис. 7 показан годовой ход эксцесса дейтерия d ($d = \delta D - 8\delta^{18}\text{O}$). Этот параметр обнаруживает минимум летом и максимум зимой, т.е., имеет сезонную изменчивость, обратную температуре воздуха и δD . Предполагается, что это отражает годовой ход температуры в источнике влаги: летом средняя взвешенная температура испарения влаги понижается за счет смещения источника в более высокие широты [26, 30, 45]. Таким образом, влияние условий в источнике влаги приводит к увеличению годовой амплитуды изотопного состава (δD) осадков за счет относительно меньшего изотопного изотопирования летом (см. уравнение (1)) по сравнению с зимой.

Коэффициент корреляции между средними месячными значениями δD и температуры воздуха составляет $0,89 \pm 0,14$ при соответствующем коэффициенте линейной регрессии, равном $2,12 \pm 0,35\text{‰} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, что существенно меньше, чем $6\text{‰} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ — значение, предсказываемое изотопной моделью. Указанная разница во многом объясняется сильными внутригодовыми изменениями местных условий, в частности, интенсивности приземной инверсии. Действительно, соотношение между внутригодовыми колебаниями температуры на верхней границе инверсии (приблизитель-

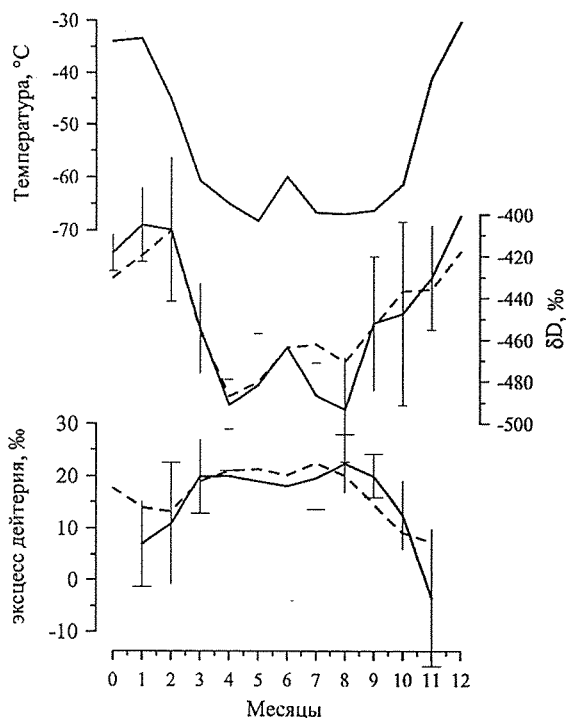


Рис. 7. Сопоставление сезонных вариаций изотопного состава осадков (δD и эксцесса дейтерия) с поверхностной температурой воздуха (сплошные линии).

Пунктиром показан изотопный состав образцов переметенного снега. Вертикальные линии обозначают изменчивость (1σ) изотопного состава отдельных образцов осадков в пределах данного месяца.

но совпадающей с уровнем конденсации, как указано выше) и в приземном слое, составляет $0,32 \pm 0,02$ [31], что вдвое ниже коэффициента $0,67$, используемого в изотопных моделях [42].

У нас нет возможности сопоставить δD в осадках с соответствующей температурой на верхней границе слоя инверсии, поскольку в 2000 г. аэрологические наблюдения не проводились. Вместо этого были взяты средние месячные значения T_i за период 1963–1991 гг. Соответствующий коэффициент регрессии оказался равным $6,2 \pm 1,1 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что на 30 % меньше коэффициента $9 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$, предсказываемого моделью. Это несоответствие не может быть объяснено влиянием условий в источнике влаги и предполагает погрешности в настройке модели.

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА СНЕГА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 50 ЛЕТ

Наиболее примечательной особенностью исследуемых вертикальных профилей δ (рис. 3) являются регулярные квазипериодические колебания изотопного состава с абсолютным размахом порядка 60–80 ‰ (для δD), что составляет около 70–90 % амплитуды годового хода изотопного состава снежных осадков в районе станции Восток (рис. 7). Размах стратиграфических колебаний изотопного состава снега заметно превышает изменения δD в интервале керна, соответствующем по возрасту льда переходу от максимума последнего оледенения (МПО) к голоцену (около 50–55 % [48]).

Как установлено в результате изучения пространственной изменчивости изотопного состава снега, эти колебания обусловлены, в основном, перемещением мезо-дюн различного масштаба. Чтобы удалить рельефообусловленный шум и выделить вариации δD , связанные с климатической изменчивостью, был построен сводный ряд изотопного состава снега по 8-ми шурфам за период 1943–1998 гг., представленный на рис. 8а.

Как видно из графика на рис. 8а, изотопный состав снега заметно менялся за последние полвека: наиболее низкие значения наблюдались в 1953–1964 гг., за которыми последовал рост δD вплоть до максимума в 1980-х гг., сменившийся новым снижением изотопного состава в последние 10–20 лет. Похожий межгодовой ход обнаруживается в сводном ряду скорости накопления снега, также представленном на рис. 8а.

Сводный ряд δD обнаруживает значимую корреляцию с рядом приземной температуры воздуха с коэффициентом корреляции, равным $0,57 \pm 0,14$ (для рядов, сглаженных с периодом 7 лет), что говорит о ведущей роли местных условий при формировании изотопного состава осадков, как это было уже показано на примере сезонного хода (рис. 7). Было установлено, что эта корреляция формируется, в основном, колебаниями с периодом около 50 лет, тогда как более короткопериодные колебания δD (10-летние) обусловлены, по-видимому, изменением условий в источнике влаги [31]. С целью подавления 10-летних колебаний, было предложено сглаживать сводные ряды изотопного состава с периодом 11 лет. В этом случае коэффициент корреляции между δD и T_s равен $0,76 \pm 0,12$, а соответствующий коэффициент регрессии составляет $28 \pm 4,5$ ‰ °C⁻¹. Последний существенно больше соответствующего коэффициента, предсказываемого изотопной моделью, однако природа этого различия до сих пор не ясна. Коэффициент регрессии между δD и температурой на верхней границе инверсии оказался равен $5,4 \pm 3,4$ ‰ °C⁻¹ (статистически незначим вследствие слишком короткого ряда T_i). Даже учитывая относительно большую ошибку этого значения, оно оказалось существенно ниже ко-

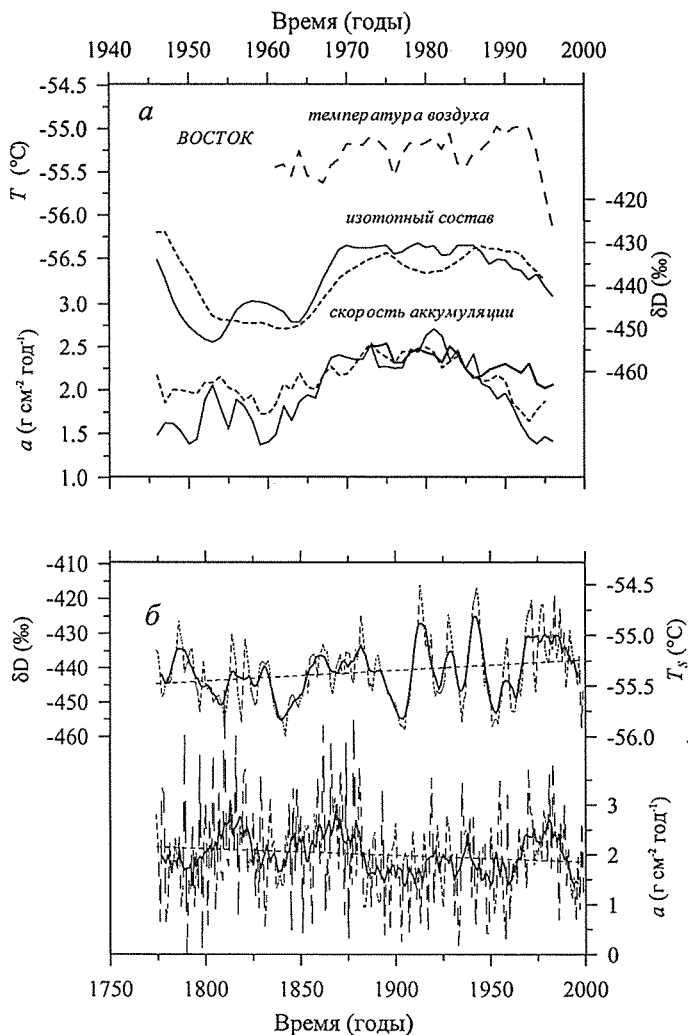


Рис. 8. Сопоставление сводных рядов изотопного состава и скорости аккумуляции снега по восьми мелким шурфам (мелкий пунктир) с рядом температуры воздуха (крупный пунктир), сводными рядами изотопного состава и аккумуляции снега по глубоким шурфам (тонкие сплошные линии) и рядом инструментальных наблюдений за накоплением снега на снегомерном полигоне (жирная сплошная линия) (а). Сводные ряды изотопного состава (δD) и накопления снега (a) по глубоким шурфам за период с 1775 по 1999 г. Тонкими линиями показаны исходные ряды, а жирными – сглаженные с периодом 7 лет (б).

эфициента $9 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$, полученного с применением простой изотопной модели и используемого в современных палеотемпературных реконструкциях по данным глубокого изотопного профиля [48]. С другой стороны, коэффициент $5,4 \pm 3,4 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$ близок коэффициенту регрессии между T_i и δD для сезонного хода (см. предыдущий раздел) и совпадает с соответствующим коэффициентом, установленным в результате анализа распределения температуры в глубокой скважине на станции Восток [50].

ИЗМЕНЕНИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА И СКОРОСТИ НАКОПЛЕНИЯ СНЕГА В РАЙОНЕ СТАНЦИИ ВОСТОК ЗА ПОСЛЕДНИЕ 200 ЛЕТ

На рис. 8б представлены сводные ряды изотопного состава и скорости накопления снега по трем глубоким шурфам (*vk10*, *vk99* и *st30*) за период с 1774 по 1999 г. В обоих рядах выявлены циклы с периодом порядка 50–60 лет, более четко выраженные для ряда аккумуляции. Предполагается, что указанные колебания связаны с изменениями циклонической активности вокруг Антарктиды [34, 47]. В частности, Еномото (1991) на основании анализа среднего июльского давления воздуха на уровне моря в средних широтах южного полушария ($40\text{--}50^\circ$ ю.ш.) за период 1873–1981 гг. пришел к выводу о существовании 40–60 летнего цикла меридиональной циркуляции.

Квази-периодические 50-летние колебания были недавно выявлены и в изменении температуры, интенсивности зонального/меридианального переноса, концентрации CO_2 , а также биологической продуктивности в Тихом океане [24]. Эти вариации связываются с существованием так называемого Тихоокеанского многолетнего колебания PDO (*Pacific Decadal Oscillation*), по своему механизму схожего с Эль-Ниньо (см., например, [52]). Наиболее отчетливо указанные колебания проявляются в изменении биологической активности Тихого океана, особенно — в изменении численности популяций анчоусовых и сардиновых рыб [24]: когда первых много, вторые почти исчезают, и наоборот. «Сардиновая» фаза цикла (наблюдавшаяся с середины 70-х до начала 90-х гг. XX в.) характеризуется повышенными по сравнению со средним многолетним значениями температуры воды в центральной и восточной частях Тихого океана и пониженными значениями — в северо-западной и южной его частях. «Анчоусовая» фаза (наблюдавшаяся с начала 50-х до середины 70-х гг. прошлого века, и вновь начавшаяся в первую половину 90-х гг.) характеризуется обратным распределением температуры. На рис. 9 индекс PDO за период 1900–2000 гг. сопоставлен с рядами скорости накопления снега и температуры воздуха по данным станции Восток. Все три параметра обнаруживают достаточно синхронные колебания, что позволяет предполагать наличие связи между ними. Корреляция между климатическими условиями в Центральной Антарктиде и в тропической зоне Тихого океана, с одной стороны, означает существование

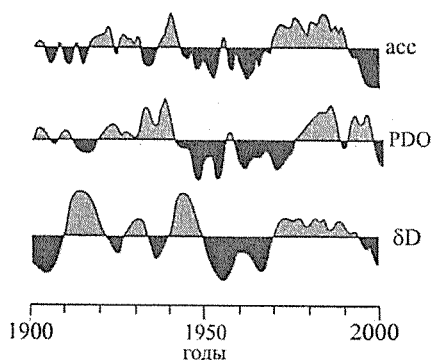


Рис. 9. Сопоставление индекса PDO с рядами скорости накопления снега и температуры воздуха в районе станции Восток за последние 100 лет

дальних климатических связей (*teleconnection*) между этими регионами, а с другой — подтверждает предположение о том, что именно Тихий океан является основным источником влаги для района станции Восток [10]. Таким образом, полученный результат имеет большое значение для климатологии всего Южного полушария в целом.

Приведенные на рис. 8б данные показывают, что абсолютный размах колебаний скорости аккумуляции в районе станции Восток за последние 200 лет составил $1,5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (от $1,5$ до $3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \text{ год}^{-1}$). Соответствующий размах колебаний изотопного состава равен $25\text{--}30 \text{ ‰}$. Согласно указанному выше коэффициенту регрессии ($28 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$), это соответствует колебаниям 11-летних средних значений температуры с размахом около $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ (между -55 и $-56 \text{ } ^\circ\text{C}$). В целом, полученные данные свидетельствуют об относительной устойчивости климата центральной Антарктиды на протяжении последних двух столетий.

Другой интересной особенностью изучаемых рядов является противоположный знак трендов δD и a за последние 226 лет. В течение этого периода времени значения δD увеличились на 7 ‰ (что составляет около $25\text{--}30 \text{ ‰}$ от общего размаха колебаний изотопного состава). Указанный тренд оказался статистически значимым, что свидетельствует о незначительном потеплении в районе станции Восток за последние два века. В то же время, скорость накопления снега снизилась на $0,3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (20 ‰ от общего размаха колебаний). Предполагается [11, 33], что этот тренд (статистически незначимый) обусловлен скорее влиянием мега-дюн на пространственную и временную изменчивость скорости накопления, чем климатическими вариациями количества осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные нами исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Осадки в центральной Антарктиде представлены двумя основными типами: осадки из ясного неба (ледяные иглы) и осадки из облаков, доля которых в общей сумме составляет, соответственно, 3/4 и 1/4. Средняя взвешенная годовая температура конденсации в районе станции Восток равна $-39 \pm 1,6$ °C.

2. Временные колебания изотопного состава и скорости накопления снега с периодами около 2–3, 5 и 20 лет, наблюдаемые в отдельно взятой точке в районе станции Восток, преимущественно обусловлены миграцией волн снегонакопления различного масштаба. Происхождение последних связывается с существованием соответствующих форм снежной поверхности (мезо-дюн).

3. Сезонные вариации изотопного состава осадков следуют внутригодовым изменениям температуры воздуха. Годовой цикл эксцесса дейтерия противоположен ходу δD и температуры и, вероятно, определяется сезонными изменениями метеорологических условий в источнике влаги. Коэффициент регрессии между изотопным составом осадков и температурой конденсации ($6,2 \pm 1,1$ ‰ °C⁻¹) оказался на 30 % меньше предсказываемого простой изотопной моделью, что предполагает наличие погрешностей в настройках последней.

4. Межгодовые изменения изотопного состава снега линейно связаны с колебаниями температуры воздуха с коэффициентом регрессии для 11-летних средних, равным 28 ‰ °C⁻¹. Короткопериодные (около 10 лет) колебания изотопного состава определяются, в первую очередь, влиянием источника влаги.

5. За последние 200 лет температура приземного слоя воздуха и скорость накопления снега в районе станции Восток колебались в пределах от -56 до -55 °C и от $1,5$ до 3 г·см⁻² год⁻¹, соответственно. Значимый положительный тренд ряда температуры свидетельствует о незначительном потеплении в этом районе за последние два века.

6. В колебаниях температуры воздуха и скорости накопления снега выявлен отчетливый 50-летний цикл, который обнаруживает связь с вариациями температуры поверхности воды в тропической зоне Тихого океана, предположительно являющейся основным источником влаги для района станции Восток.

Дальнейшие разработки и исследования по проблемам, поднятым в настоящей работе, будут продолжаться по следующим основным направлениям:

1. Более глубокий анализ метеорологического режима станции Восток с использованием доступной базы данных метеорологических и аэрологических наблюдений.

2. Изучение пост-депозиционных изменений изотопного состава нежных осадков.

3. Моделирование изотопного состава и количества осадков в центральной Антарктиде с помощью простых изотопных моделей, региональных климатических моделей, а также GCMs.

4. Привлечение широкого спектра климатической информации, такой как температура поверхности воды в южном полушарии, индексы циркуляции, площадь морских льдов и т.д.

Полученные результаты будут использованы для интерпретации данных изотопного состава, полученных по ледяным кернам из глубоких скважин, пробуренных на станции Восток.

Авторы выражают глубокую признательность:

— всем сотрудникам и участникам Российской Антарктической Экспедиции за неоценимую помощь при проведении полевых исследований;

— специалистам из Лаборатории гляциологии и геофизики окружающей среды (г. Гренобль, Франция), Лаборатории изучения климата и окружающей среды (г. Сакле, Франция) и Института Нильса Бора (г. Копенгаген, Дания) за содействие в осуществлении лабораторных исследований;

— В.Н.Голубеву, Ж.Жузелю, С.Йонсену, В.Е.Лагуну, В.Массон-Дельмотт, Ж.Р.Пети, В.Ф.Радионову, А.Н.Саламатину и многим другим за ценные комментарии;

— студентам географического факультета А.Быковой, Д.Ануфриевой, А.Захарову, Ю.Попову, а также сотруднице отдела географии ААНИИ А.В.Преображенской за помощь в создании базы данных аэрологических наблюдений;

Работа осуществлялась в рамках проекта «Исследовать изменения климата и окружающей среды по данным изучения ледяных кернов из глубоких кважин и донных отложений водоемов антарктических оазисов и окраинных морей Антарктиды. Провести микробиологические исследования глубоких горизонтов ледникового покрова» подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан». Исследования проводились также при финансовой поддержке РФФИ, грант 02-05-22003 НЦНИа.

Поступила 14.10.2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянов В.Г.* Гляциоклиматология Антарктиды. —Л.: Гидрометеиздат, 1990. —200 с.
2. *Артемьев А.Н.* Взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности на антарктическом плато // Тр. Сов. антаркт. экспед. —1976. —Т. 66. —С. 107.
3. *Аэрологический справочник Антарктиды.* —Л.: Гидрометеиздат, 1967. —Кн. 1. —380 с.
4. *Барков Н.И., Липенков В.Я.* Накопление снега в районе станции Восток в 1970—1973 гг. // Информ. бюл. Сов. антаркт. экспед. —1978. —№ 98. —С. 63–68.
5. *Барков Н.И., Липенков В.Я.* Накопление снега в районе станции Восток, Антарктида, в 1970—1992 гг. // Материалы гляциол. исслед. —М., 1996. —Вып. 80. —С. 87–88.
6. *Васильчук Ю.К., Котляков В.М.* Основы изотопной геокриологии и гляциологии. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. —616 с.
7. *Голубев В.Н., Сократов С.А., Гребенников П.Б.* Изменения изотопного состава снежно-фирновой толщи в результате испарения и массопереноса // Ритмы природны процессов в гляциосфере Земли: Тез. докл. XII гляциол. симп. —М., 2000. —С. 16.
8. *Гордиенко Ф.Г., Барков Н.И., Орлов А.И.* Вариации изотопного состава атмосферных осадков и озерной воды в Антарктиде и Субантарктике // Материалы гляциол. исслед. —М., 1976. —Вып. 26. —С. 150–154.
9. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Барков Н.И.* Пространственно-временная структура поля снегонакопления в районе станции Восток, центральная Антарктида // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. —1998. —Вып. 4, № 28. —С. 38–50.
10. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Барков Н.И., Пети Ж.Р., Массон В.* Изотопный состав поверхностного слоя снежной толщи в районе станции Восток, Центральная Антарктида // Материалы гляциол. исслед. —М., 2001. —Вып. 90. —С. 69–79.
11. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Пети Ж.Р., Массон-Дельмотт В.* 50-ти летний цикл в изменениях аккумуляции и изотопного состава снега на станции Восток // Материалы гляциол. исслед. —М., 2003. —Вып. 94. —С. 163–173.
12. *Зайцева Н.А.* О сопоставимости данных различных систем радиозондирования // Метеорол. исслед. в Антарктике: Сб. докл. на III Всесоюз. симп. —Л., 1991. —Ч. II. —С. 120–123.
13. *Казакова Н.Н.* Методы аэрологических наблюдений в Антарктике и перспективы их развития. — Метеорологические исследования в Антарктике // Метеорол. исслед. в Антарктике: Сб. докл. на II Всесоюз. симп. —Л., 1986. —Ч. II. —С. 102–106.
14. *Котляков В.М.* Снежный покров Антарктиды и его роль в современном оледенении материка. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. —246 с.
15. *Липенков В.Я., Барков Н.И., Саламатин А.Н.* История климата и оледенения Антарктиды по результатам изучения ледяного ядра со станции Восток // Пробл. Арктики и Антарктики. —2000. —Вып. 72. —С. 197–236.
16. *Саламатин А.Н., Вострецов Р.Н., Пети Ж.Р., Липенков В.Я., Барков Н.И.* Геофизические и палеоклиматические приложения составного температурного профиля из глубокой скважины на станции Восток (Антарктида) // Материалы гляциол. исслед. —М., 1998. —Вып. 85. —С. 223–240.
17. *Справочник по климату Антарктиды.* —Л.: Гидрометеиздат, 1977. —Т. 2. —493 с.
18. *Третья континентальная экспедиция 1958–1959. Материалы наблюдений Аэрология.* —Л.: Гидрометеиздат, 1962. —518 с.

19. Четвертая КАЭ 1959. Материалы наблюдений. Аэрология. — Тр. Сов. антаркт. экспед. — 1963. — Т. 33. — 125 с.
20. *Швердтфегер В.* Погода и климат Антарктики / Пер. с англ. под ред. А.И. Воскресенского. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 264 с.
21. *Black H.P., Budd W.* Accumulation in the region of Wilkes, Wilkes Land, Antarctica // *J. Glac.* — 1964. — Vol. 5, № 37. — P. 3–15.
22. *Boyle E.A.* Cool tropical temperature shift the global $\delta^{18}\text{O}$ -T relationship: An explanation for the ice core $\delta^{18}\text{O}$ — borehole thermometry conflict? // *GRL*. — 1997. — Vol. 24, № 3. — P. 273–276.
23. *Bromwich D.H.* Snowfall in high southern latitudes // *Reviews of Geophysics*. — 1988. — Vol. 26, № 1. — P. 149–168.
24. *Chavez F.P., Ryan J., Lluch-Cota S.E., Niquen M.C.* From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean // *Science*. — 2003. — Vol. 299. — P. 217–221.
25. *Ciais P., Jouzel J.* Deuterium and oxygen 18 in precipitation: Isotopic model, including mixed cloud processes // *J. Geophys. Res.* — 1994. — Vol. 99, № D8. — P. 16793–16803.
26. *Ciais P., White J.C.W., Jouzel J., Petit J.R.* The origin of present day Antarctic precipitation from surface snow deuterium excess data // *J. Geophys. Res.* — 1995. — Vol. 100, № 9. — P. 18917–18927.
27. *Cuffey K.M., Clow G.D., Alley R.B., Stuiver M., Waddington E.D., Saltus R.W.* Large Arctic temperature change at the Wisconsin-Holocene glacial transition // *Science*. — 1995. — Vol. 270. — P. 455–458.
28. *Cuffey K.M., Vimeux F.* Covariation of carbon dioxide and temperature from the Vostok ice core after deuterium excess correction // *Nature*. — 2001. — Vol. 412. — P. 523–527.
29. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. — 1964. — Vol. 16. — P. 436–468.
30. *Delmotte M., Masson V., Jouzel J., Morgan V.* A seasonal deuterium excess signal at Law Dome, coastal eastern Antarctica: a southern ocean signature // *J. Geophys. Res.* — 2000. — 105 (D6). — P. 7187–7197.
31. *Ekaykin A.A.* Meteorological regime of central Antarctica and its role in the formation of isotope composition of snow thickness. — Thèse de Doctorat d'Etat. Université Joseph Fourier. — Grenoble I, 2003. — 123 p.
32. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Barkov N.I., Petit J.R., Masson-Delmotte V.* Spatial and temporal variability in isotope composition of recent snow in the vicinity of Vostok Station: Implications for ice-core interpretation // *Annals of Glaciology*. — 2002. — Vol. 35. — P. 181–186.
33. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kuzmina I.N., Petit J.R., Masson-Delmotte V., Johnsen S.* The changes in isotope composition and accumulation of snow at Vostok Station over the past 200 years // *Annals of Glaciology*. — 2003. Vol. 39 (in press).
34. *Enomoto H.* Fluctuations of snow accumulation in the Antarctic and sea level pressure in the southern hemisphere in the last 100 years // *Kluwer Academic Publishers*. — 1991. — *Climatic Chang.* № 18. — P. 67–87.
35. *Fisher D.A.* Remarks on the deuterium excess in precipitation in cold regions // *Tellus*. — 1991. — Vol. 43B. — P. 401–407.
36. *Fisher D.A., Reeh N., Clausen H.B.* Stratigraphic noise in time series derived from ice cores // *Ann. of Glac.* — 1985. — Vol. 7. — P. 76–83.

37. Gow A.J., Rowland R. On the relationship of snow accumulation to surface topography at «Byrd Station», Antarctica // *J. Glac.* — 1965. — Vol. 5, № 42. — P. 843–847.
38. Johnsen S.J., Dahl-Jensen D., Dansgaard W., Gundestrup N. Greenland temperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles // *Tellus*. — 1995. — Vol. 47B. — P. 624–629.
39. Johnsen S., Dansgaard W., White J.W.C. The origin of Arctic precipitation under present and glacial conditions // *Tellus*. — 1989. — Vol. 41B. — P. 452–468.
40. Joussaume S. Climat d'hier à demain. — CNRS Editions. — Paris, 1993. — 143 p.
41. Jouzel J., Alley R.B., Cuffey K.M., Dansgaard W., Grootes P., Hoffmann G., Johnsen S.J., Koster R.D., Peel D., Shuman C.A., Stievenard M., Stuiver M., and White J. Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores // *J. Geophys. Res.* — 1997. — Vol. 102, № C12. — P. 26471–26487.
42. Jouzel J., Merlivat L. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation // *J. Geophys. Res.* — 1984. — Vol. 89, № D7. — P. 11749–11757.
43. Jouzel J., Vimeux F., Caillon N., Delaygue G., Hoffmann G., Masson-Delmotte V., Parrenin F. Magnitude of isotope/temperature scaling for interpretation of central Antarctic ice cores // *J. Geophys. Res.* — 2003. — Vol. 108. — N D12. — P. ACL 6-1–6-6.
44. Lipenkov V.Ya., Barkov N.I., Ekaykin A.A., Petit J.R., Nikolayev V.I. Accumulation and stratigraphy of snow at Vostok Station, East Antarctica // *International Symposium on Antarctica and Global Change: Interactions and Impacts*. — Hobart, Tasmania, 13–18 July 1997. — P.312–319.
45. Masson-Delmotte V., Delmotte M., Morgan V., Etheridge D., Van Ommen T., Tartarin S., Hoffmann G. Recent climate variability in coastal eastern Antarctica (1930–1990): an abrupt atmospheric circulation change in the 1970s archived in Law Dome DE08-2 ice core deuterium excess record // *Climate Dynamics*. (in press).
46. Merlivat L., Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation // *J. Geophys. Res.* — 1979. — Vol. 84, № C8. — P. 5029–5033.
47. Morgan V.I., Goodwin I.D., Etheridge D.M., Wookey C.W. Evidence from Antarctic ice cores for recent increases in snow accumulation // *Nature*. — 1991. — Vol. 354. — P. 58–60.
48. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. — 1999. — Vol. 399. — P. 429–436.
49. Pourchet M., Magand O., Frezzotti M., Ekaykin A., Winther J.-G. Radionuclides deposition over Antarctica // *J. of Environmental Radioactivity*. — 2003. — Vol. 68. — P. 137–158.
50. Salamin A.N., Lipenkov V.Ya., Barkov N.I., Jouzel J., Petit J.R., Raynaud D. Ice-core age dating and paleothermometer calibration on the basis of isotope and temperature profiles from deep boreholes at Vostok Station (East Antarctica) // *J. Geophys. Res.* — 1998. — Vol. 103, № D8. — P. 8963–8977.
51. Steig E.J., Grootes P.M., Stuiver M. Seasonal precipitation timing and ice core records // *Science*. — 1994. — Vol. 266. — P. 1885–1886.

52. *Trenberth K.E., Hurrell J.W.* Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific // *Climate Dynamics*. —1994. —Vol. 9. —P. 303–319.
53. *Van der Veen C.J., Mosley-Thompson E., Gow A., Mark B.G.* Accumulation at South Pole: Comparison of two 900-year records // *J. Geophys. Res.* —1999. —Vol. 104, № D24. —P. 31067–31076.
54. *Vimeux F., Cuffey K.M., Jouzel J.* New insights into Southern Hemisphere temperature changes from Vostok ice core using deuterium excess correction // *Earth and Planetary Science Letters*. —2002. —Vol. 203. —P. 829–843.
55. *Waddington E.D., Steig E.J., Neuman T.A.* Using characteristic times to assess whether stable isotopes in polar snow can be reversibly deposited // *Ann. Glac.* —2002. —Vol. 35. —P. 118–124.
56. *Werner M., Mikolajewicz U., Heimann M. and Hoffmann G.* Borehole Versus Isotope Temperatures on Greenland: Seasonality Does Matter // *Geophys. Res. Lett.* —2000. —Vol. 27, № 5. —P. 723–726.
57. *Whillans I.M.* Effect of inversion winds on topographic detail and mass balance on inland ice sheets // *J. Glac.* —1975. —Vol. 14, № 70. —P. 85–90.

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВОГО РЕЖИМА ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Восток — это, прежде всего, уникальная водная экосистема, изолированная от земной атмосферы и поверхностной биосферы на протяжении миллионов лет. Значительные размеры озера (280 × 50 км, мощность водного слоя достигает 1200 м, [8]) позволяют рассматривать его в качестве земного аналога морей, существующих под многокилометровыми ледяными панцирями на спутниках Юпитера Европа и Каллисто. Полное отсутствие света, высокое давление, специфический газовый и химический состав воды, а также продолжительная изолированность озера Восток предполагают возможность возникновения и развития здесь форм жизни и процессов, существенно отличающихся от известных современной науке, возможность сохранения реликтовых видов и проявления иных, еще не исследованных путей эволюционной адаптации микроорганизмов, изучение которых будет способствовать лучшему пониманию процессов развития жизни как на нашей планете, так и на других планетах солнечной системы.

Исследование газового режима подледникового озера — необходимая составная часть изучения его как экосистемы. Газовый состав озерной воды является тем параметром этой системы, который определяет и одновременно отражает видовое разнообразие подледниковой микробиоты, создает условия, способствующие или препятствующие развитию жизни подо льдом.

В отличие от перенасыщенных воздухом поверхностных антарктических озер с многолетним ледяным покровом [32], подледниковые озера характеризуются высокими гидростатическими давлениями (340–400 атм. в озере Восток). Благодаря этому, при определенном насыщении воды газами, в этих озерах могут образовываться многокомпонентные газовые гидраты, что существенно усложняет общую картину их газового режима [19,

20]. Определение роли газовых гидратов в газовом и гидрологическом режиме подледниковых озер рассматривается как один из принципиальных моментов в изучении функционирования подледниковых экосистем [28].

В настоящей работе мы предприняли попытку теоретически рассчитать эволюцию основных газовых параметров озера Восток с учетом возможного гидратообразования. Результаты расчетов, выполненных для стационарных условий, предполагающих баланс между приходом (таянием) и потерей (намерзанием) воды в озере, сравниваются с реконструкцией газового состава воды по данным газовых анализов керна озерного льда, полученного из глубокой скважины 5Г-1 на станции Восток.

ИСТОЧНИКИ И СТОКИ ГАЗОВ В ОЗЕРЕ ВОСТОК

В геологическом отношении озеро Восток представляет собой рифтовый грабен, образовавшийся в позднелюрско-раннемеловое время как продолжение единой рифтовой системы ледников Ламберта - Эймери и залива Приудс. Мощность осадочного чехла, сформировавшегося здесь до начала оледенения Антарктиды (около 30 млн. лет назад), достигает 3–5 км [16]. История возникновения озера Восток как водоема достоверно не установлена. Теоретически показано, что оно могло существовать в рифтовой депрессии задолго до начала оледенения Антарктиды [1]. Большинство исследователей, однако, склоняется к тому, что озеро возникло в результате донного таяния ледника во время или после образования континентального ледникового покрова в его современных размерах (15 млн. лет назад) [15, 26].

Мощность ледникового щита, перекрывающего озеро, увеличивается в направлении с юга на север от 3750 м в районе станции Восток до 4200 м в 250 км к северу от станции [8]. В соответствии с этим, в северной части озера преимущественно происходит таяние базального ледникового льда при температуре $-3,2^{\circ}\text{C}$ и давлении 37,8 МПа, в то время как на его южной окраине идет намерзание воды на нижнюю поверхность ледника при $-2,9^{\circ}\text{C}$ и 33,9 МПа.

Циркуляция воды в озере, индуцируемая геотермальным потоком и теплом фазовых переходов и поддерживаемая градиентами плотности, возникающими здесь благодаря наклону ледяной кровли озера и разнице в степени минерализации талой и резидентной воды, способствует «переносу льда» из северной части озера в его южную часть, «работая», таким образом, на выравнивание ледникового покрова по мощности [27, 33]. Выталкивание примесей в процессе замерзания воды приводит к образованию чистого конжеляционного (озерного) льда, содержание в котором газовых, химических и биологических компонентов в 100–1000 раз меньше, чем в воде озера [26, 27]. Движущийся ледник выносит наросший на

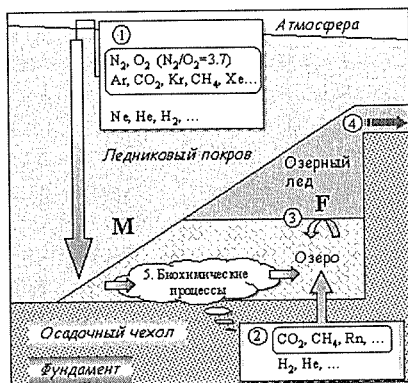


Рис. 1. Основные источники и стоки газов в озере Восток.

1 — атмосферные газы поступают в озеро через ледник в зоне таяния (*М*) ледникового льда (рамкой выделены гидратообразующие газы); 2 — газы, которые могут поступать в озеро по разлому земной коры; 3 — образование озерного льда в зоне намерзания (*Р*) сопровождается выталкиванием газов в воду, что приводит к их аккумуляции в подледниковом озере; 4 — незначительное количество газов, включенных в озерный лед, выносятся за пределы озера; 5 — потребление и выделение газов в результате биогеохимических реакций в осадках и в водном слое

его основание озерный лед за пределы озерной котловины (рис. 1), обеспечивая предполагаемый баланс между приходом и расходом воды в озере [9, 13, 19, 27]. Очевидно, что при достаточной интенсивности и продолжительности описанного выше кругооборота воды, в подледниковом водоеме должно происходить накопление газов и химических примесей, поступающих сюда из атмосферы через ледник и из осадков на дне озера.

Атмосферный воздух захватывается льдом в виде газовых включений в процессе рекристаллизационного превращения фирна в лед, которое завершается на глубине примерно 100 м от поверхности ледника. Газовые анализы, проведенные по керну станции Восток и по кернам скважин, пробуренных на профиле Мирный—Восток, свидетельствуют о том, что общее газосодержание антарктического льда, слагающего ледниковый покров в районе озера, составляет в среднем $0,09 \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$ (здесь и далее количество газа будем выражать его объемом при н. у.: $T = 273,1 \text{ К}$, $p = 0,1013 \text{ МПа}$) и характеризуется относительно малой изменчивостью ($\pm 5 \%$) как по глубине, так и в пространстве [6, 7].

По мере погружения ледяных слоев и увеличения давления газа в пузырьках, последние постепенно трансформируются в кристаллические включения гидрата воздуха [22]. В районе станции Восток эта трансформа-

ция завершается на глубине 1300 м [17], глубже которой большая часть воздуха (97–99 %), содержащегося во льду, локализована во включениях газовых гидратов и лишь незначительное количество его (1–3 %) растворено в кристаллической решетке льда [11]. В процессе таяния ледникового льда в северной части озера гидраты высвобождаются из льда в подледниковую воду и либо растворяются в ней, либо остаются стабильными, в зависимости от достигнутой степени насыщения воды атмосферными газами [19, 21]. Таким образом, ледниковый покров является конвейером, транспортирующим в озеро Восток атмосферные газы, главным образом, в форме газового гидрата. Состав поставляемых газов (см. рис. 1) соответствует составу атмосферного воздуха, в котором азот и кислород (в соотношении $N_2/O_2 \approx 3,7$), дают вместе более 99 % от общего объема всей газовой смеси. Масса талой воды, поступающей в озеро в результате донного таяния, оценивается в $1,3 \cdot 10^8$ т в год [9], и, следовательно, объем воздуха ежегодно «закачиваемого» в озеро из атмосферы составляет $1,2 \cdot 10^7$ м³. Общий объем газов, ежегодно извлекаемых из озера и выносимых за его пределы вместе с конжеляционным льдом, по нашим оценкам, основанным на результатах газовых анализов керна этого льда (см. ниже), не превышает $5,5 \cdot 10^4$ м³.

Газы могут поступать в озеро со дна водоема (см. рис. 1). Согласно проведенным исследованиям [13], гелий, захваченный из озера при образовании конжеляционного льда, имеет изотопное соотношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в четыре раза меньше атмосферного (последнее характерно для гелия, содержащегося в ледниковом льду), что указывает на поступление в воду со дна озера радиогенного гелия, в котором преобладает ^4He . Отсутствие в озерном льду мантийного гелия с высоким соотношением $^3\text{He}/^4\text{He}$ [13] свидетельствует о том, что рифт озера Восток является в настоящее время пассивной структурой и не испытывает тектонической реактивации [16]. Вместе с тем, обнаружение в ледяном керне ДНК термофильных бактерий (хемолитоавтотрофных мезотермофилов), родственных тем, которые обитают в гидротермах активных областей океанов и континентов при температурах 40–60 °С, позволяет говорить о существовании гидротермальной среды на большой глубине под озером [10, 16]. При этом предполагается, что инфильтрационные воды, мигрирующие по разломам и трещинам в земной коре на глубину до 3 км, могут затем подниматься ко дну озера, в частности, благодаря наблюдаемой в данном районе слабой сейсмотектонической активности [16].

Выходящие на поверхность дна озера пластовые воды, как правило, содержат в себе газы органического и неорганического происхождения (см. рис. 1). О составе газов, поступающих в озеро по трещинам можно косвенно судить по видовому составу бактерий в керне озерного льда. Один из об-

наруженных видов представлен бактериями, окисляющими водород в присутствии углекислого газа как источника углерода, другой развивается в анаэробной, богатой органикой среде, содержащей сульфиды-сульфаты и метан [10]. Суммарный приток газов, поступающих в озеро по трещинам в земной коре, по-видимому, существенно меньше того, который идет из атмосферы через ледниковый покров. Об этом свидетельствует весьма неотчетливое отражение в изотопном профиле озерного льда присутствия в озере инфильтрационных вод, обогащенных тяжелым кислородом ^{18}O [14].

Биогеохимические реакции, связанные с жизнедеятельностью микроорганизмов, возможно обитающих в воде озера и, что наиболее вероятно, в его придонном слое, являются еще одним потенциальным источником и стоком газов в подледниковом водоеме (см. рис. 1). Этот компонент общего газового бюджета озера Восток в настоящее время наименее изучен, поскольку остаются неизвестными как видовой состав, так и общая масса подледниковой микробиоты. Среди процессов, связанных с продуцированием и поглощением газов, вероятными для озера Восток считают гетеротрофный метаболизм (окисление органического углерода кислородом с выделением CO_2), нитрификацию и денитрификацию (выделение N_2O) и ряд других [21, 26]. Вместе с тем, ультранизкий уровень концентрации в озерном льду органического углерода ($0-2,5 \cdot 10^{-8}$) и малое количество бактериальных клеток с сохранившейся ДНК, по-видимому, отражают достаточно слабое развитие жизни, по крайней мере, в верхнем слое водной толщи [10], что не предполагает сколько-нибудь существенного вклада процессов метаболизма в газовый режим подледникового водоема.

Несмотря на то, что результаты проведенных газовых анализов (см. ниже) свидетельствуют о повышенном содержании CO_2 и N_2O в образцах озерного льда, доминируют в нем азот и кислород, составляющие вместе около 98 % от объема газов, захваченных в процессе намерзания озерной воды на нижнюю поверхность ледникового покрова. Рассмотрение основных источников и стоков газов в подледниковом озере Восток, а также предварительные данные о газовом составе озерного льда приводят к выводу о том, что основными процессами, контролирующими газовый режим этого подледникового водоема, являются поступление атмосферных газов через ледник и их аккумуляция в озере за счет образования озерного льда. Таким образом, газовый состав озера Восток в основном определяется бюджетом атмосферных газов N_2 и O_2 .

УСЛОВИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТА ВОЗДУХА В ПОДЛЕДНИКОВОМ ОЗЕРЕ

Большинство газов, потенциально участвующих в формировании общего газового бюджета озера Восток, является гидратообразующими газа-

ми (см. рис. 1). Последнее означает, что при соответствующих парциальных давлениях (летучествах) эти газы могут образовывать с водой газовый гидрат — нестехиометрическое соединение клатратного типа, смешанный состав которого будет определять равновесную с ним концентрацию газов, растворенных в воде озера. Рассмотрим условия стабильности в подледниковом озере смешанного гидрата воздуха, имеющего кубическую структуру II [29] и включающего в качестве гостевых молекул только N_2 и O_2 .

В работе [19] на основании имеющихся лабораторных данных и теоретических расчетов нами были исследованы фазовые равновесия GLH, GHI, LHI и GLI (где G — смесь газов N_2 и O_2 ; L — жидкая вода; H — гидрат структуры II; I — лед I_h) вблизи 0 °C. Для расчета давления диссоциации p_d смешанного гидрата азота и кислорода использовался исправленный метод Миллера [22], согласно которому p_d смеси определяется соотношением [2]

$$p_d = \left[\sum \frac{x_i}{p_{di}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где p_{di} — давление чистого i -газа, входящего в смесь, а x_i — его мольная доля в газовой фазе, равная объемной доле газа в смеси. Применимость данного упрощенного подхода для газов с близкими давлениями диссоциации (например, для $i = N_2, O_2$) подтверждается хорошим совпадением значений p_d , рассчитанных по формуле (1), с результатами расчета фазовых равновесий по программе, реализующей эмпирическую аппроксимацию традиционной модели газового гидрата как идеального клатратного раствора [2]. Фазовая диаграмма клатрата гидрата воздуха, рассчитанная по описанной выше методике для газовой смеси с $N_2/O_2 = 3,7$, показана на рис. 2. Следует отметить, что, вследствие близости давлений диссоциации чистых N_2 и O_2 , изменения соотношения N_2/O_2 в газовой смеси в пределах довольно широкого диапазона (2,5...7,5) приведут лишь к незначительным смещениям показанных на диаграмме кривых трехфазных равновесий (≤ 3 % по давлению).

Более значительные смещения равновесий будут иметь место, если в систему добавить в качестве примеси какой-либо сильный гидратообразующий газ. Эксперименты, выполненные с помощью компьютерной системы расчета фазовых равновесий многокомпонентных газовых смесей [2], показывают, что добавление 1 % CH_4 или CO_2 приведет к смещению кривой GLH (см. рис. 2) вниз примерно на 4 и 10 % соответственно. Изменение общей минерализации подледниковой воды в ожидаемом диапазоне (0...1,2 ‰ [27]) не окажет заметного влияния на положение кривых трехфазного равновесия [19].

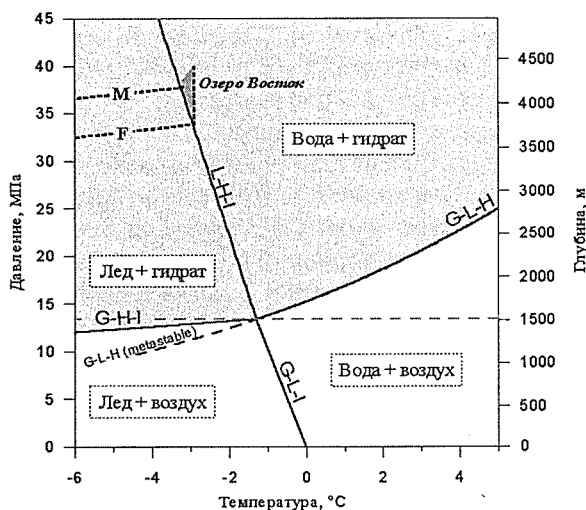


Рис. 2. Фазовая диаграмма клатрата гидрата воздуха ($N_2/O_2 = 3,7$ в газовой фазе) вблизи 0°C (по [19]). Точечные кривые показывают распределения температуры по глубине в антарктическом ледниковом покрове и в воде озера в характерных пунктах подледникового таяния (M) и намерзания (F) (по данным [23, 25, 33]). Затуманенная область графика соответствует условиям термодинамической стабильности гидрата воздуха. Затемненный треугольник в пределах этой области обозначает диапазон условий существования озера Восток

Точечные кривые M и F на рис. 2 показывают распределения температуры по глубине (см. шкалу справа) в антарктическом ледниковом покрове [23, 25] и в воде озера [33] в характерных пунктах донного таяния льда (M) и намерзания воды (F). Как следует из рис. 2, диапазон условий (p , T), характерных для подледникового озера Восток, целиком лежит в области термодинамической стабильности гидрата воздуха, что обеспечивает потенциальную возможность сохранения кристаллов газовых гидратов, вытаяивающих из ледника, и/или их роста в озерной воде. Необходимым условием для реализации этой возможности является достаточное насыщение воды растворенными газами, которое достигается при общем давлении газовой смеси равном или превышающем давление диссоциации соответствующего смешанного гидрата.

Давления диссоциации N_2 , O_2 , а также других гидратообразующих газов, потенциально присутствующих в антарктических подледниковых озерах, как правило, меньше гидростатического давления, создаваемого мощным ледниковым покровом. В этом заключается принципиальное

отличие подледниковых озер от поверхностных антарктических озер с многолетним ледяным покровом, в которых при перенасыщении воды газами могут образовываться газовые пузырьки, но не гидраты. Как видно из диаграммы на рис. 2 (см. пунктир, проходящий через квадрупольную точку диаграммы), критическая мощность ледника, еще обеспечивающая гидростатическое давление, достаточное для образования гидратов, составляет примерно 1500 м. При меньшей мощности ледника насыщение озера газами, поступающими с тающим льдом, неизбежно приведет к образованию газовых пузырьков, которые будут легко захватываться замерзающим озерным льдом и выноситься с ним за пределы озера.

Методика расчета растворимости азота (Z_{N_2}) и кислорода (Z_{O_2}) в подледниковой воде в присутствии гидрата воздуха детально изложена в [19]. Она построена на последовательном использовании уравнений Кричевского-Казарновского [5] и Истомина-Квона [4], описывающих первое — растворимость (равновесие) компонентов газовой смеси в системе «газ — вода», второе — двухфазное равновесие системы «растворенный в воде газ — гидрат» при гидростатических давлениях выше давления диссоциации смешанного гидрата. Определение коэффициентов Генри и расчет летучестей газовых компонентов производятся по методике, изложенной в [3].

Согласно классической теории газовых гидратов как идеальных клатратных растворов [30], фракционирование компонентов двухкомпонентной газовой смеси, участвующих в образовании гидратной фазы, подчиняется соотношению

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{x_1 p_{d2}}{x_2 p_{d1}}, \quad (2)$$

где y_1 и y_2 — мольные доли 1-го и 2-го газов в гидратной фазе, а p_{d1} , p_{d2} и x_1 и x_2 — их давления диссоциации и мольные доли в газовой фазе, соответственно. В тех случаях, когда газовая фаза отсутствует (как, например, в ледниковом льду глубже 1300 м и в озере Восток в целом), в уравнении (2) вместо величин x_1 и x_2 часто используют соответствующие им значения летучести газов [21]. Для большей наглядности в дальнейшем изложении мы будем оперировать в таких случаях понятием «фиктивной» (метастабильной) газовой фазы и отношением x_1/x_2 , как характеристикой состава этой фазы.

Уравнение (2) и расчеты растворимости газов в воде в присутствии гидрата по указанной выше методике позволяют приближенно оценить состав газа в гидрате (y_{N_2}/y_{O_2}), водной фазе (Z_{N_2}/Z_{O_2}) и фиктивной газовой фазе (x_{N_2}/x_{O_2}) в условиях трехфазного равновесия гидрат — лед — вода. Такое равновесие должно реализовываться на контакте антарктического ледникового покрова с озером Восток при температуре примерно -3°C и при

Таблица 1.

Расчетные значения отношения N_2/O_2 в различных фазах в условиях трехфазного равновесия гидрат–лед–вода при температуре -3°C .

Сценарий	Фаза			
	Газ*	Вода	Гидрат	Лед
I	3,7	2,0	2,7	2,6
II	7,1	3,7	5,3	4,9
III	5,0	2,5	3,7	3,5

Примечание. * – значения N_2/O_2 в фиктивной газовой фазе выделены курсивом.

условии, что концентрации растворенных в воде озера азота (z_{N_2}) и кислорода (z_{O_2}) достигли своих предельных значений, т.е. $z_{N_2} = Z_{N_2}$ и $z_{O_2} = Z_{O_2}$. Расчетные значения отношения N_2/O_2 в различных фазах в условиях данного равновесия приведены в таблице 1 для трех сценариев с различным составом газовой фазы.

Первый сценарий был детально рассмотрен в [19] для случая равновесия гидрат – лед – вода. Отметим, что по составу газовых компонентов в различных фазах он близок к условиям переходной зоны в леднике [11], однако трансформация газовых пузырьков в гидраты воздуха происходит при низкой температуре льда (около -55°C) и в этом случае мы имеем дело с системой газ – гидрат – лед (т.е. жидкая фаза отсутствует). Второго и третьего сценарии имеют более непосредственное отношение к рассматриваемому вопросу о стабильности гидратов воздуха в подледниковом озере.

Сценарий II предполагает, что все поступающие из ледника в озеро гидраты растворяются в подледниковой воде. Таким образом, на всем отрезке времени пока идет насыщение озера газами вплоть до момента начала гидратообразования (при $z_{N_2} = Z_{N_2}$ и $z_{O_2} = Z_{O_2}$) состав растворенных в воде газов характеризуется постоянным отношением $N_2/O_2 = 3,7$. В соответствии с этим отношение N_2/O_2 в фиктивной газовой фазе должно уменьшаться, пока не достигнет значения 7,1 в момент равновесия растворенного газа с гидратом при -3°C . Состав первых гидратов будет отвечать отношению $N_2/O_2 = 5,3$.

Сценарий III характеризует предельную ситуацию, когда большая часть газа в озере находится в виде гидрата, состав которого поэтому должен быть близок к составу поступающей в озеро газовой смеси ($N_2/O_2 = 3,7$).

Расчетные растворимости азота и кислорода в воде в присутствии гидрата воздуха при температуре -3°C для трех указанных сценариев даны в таблице 2. Представленные в таблице значения определяют диапазон

Таблица 2.

Расчетные значения растворимости (Z , $\text{см}^3\text{г}^{-1}$) N_2 , O_2 и воздуха в воде и льду в условиях трехфазного равновесия гидрат—лед—вода при температуре -3°C (сценарии как в табл. 1)

Сценарий	В воде			Во льду		
	N_2	O_2	Воздух	N_2	O_2	Воздух
I	1,80	0,91	2,71	0,0023	0,0009	0,0032
II	2,15	0,57	2,72	0,0026	0,0005	0,0032
III	1,96	0,77	2,73	0,0025	0,0007	0,0032

предельных концентраций растворенных газов, которые могут быть достигнуты в озере Восток.

В табл. 1 и 2 приведены также данные о равновесном составе и концентрации N_2 и O_2 , растворенных во льду. Оценки растворимости газов во льду, находящемся в равновесии с насыщенными газами водой, были сделаны нами с использованием эмпирического подхода, разработанного Т. Икеда (см., например, [11]). В основе этого подхода лежат следующие допущения и положения.

1. Линейная зависимость между растворимостью газов в решетке льда и диаметром молекул этих газов (на основании этой зависимости установлены базовые для всего метода значения концентрации молекул N_2 и O_2 в решетке льда при $T = 263\text{ K}$ и $p = 1\text{ МПа}$).

2. Отсутствие зависимости растворимости газов во льду от температуры в догидратной области.

3. Прямопропорциональное увеличение растворимости газов во льду в зависимости от их парциального давления в контактирующей со льдом газовой фазе вплоть до достижения p_d смешанного гидрата N_2 и O_2 .

4. В системе гидрат — газ, растворенный во льду, находящейся при внешнем давлении выше p_d гидрата воздуха, растворимость газов во льду определяется степенью заполнения гидрата газовыми молекулами и, следовательно, — величиной p_d , отвечающей трехфазному равновесию газ — гидрат — лед при данной температуре льда.

В рамках указанного подхода растворимость газов в условиях трехфазного равновесия гидрат — лед — вода определяется составом газовой фазы и давлением диссоциации (по отношению ко льду) смешанного гидрата при данной температуре. Ошибка приведенных в табл. 2 значений растворимости газов во льду не превышает 500 %, но, вероятнее всего, находится в пределах 100 % (Т.Икеда, персональное сообщение).

Отметим, что в наших расчетах мы не учитывали возможного влияния гидростатического давления на давление диссоциации газовых гидратов. Последнее, как предполагают некоторые авторы [21], должно приводить, при давлениях, характерных для озера Восток (35–40 МПа), к увеличению давления диссоциации чистых N_2 , O_2 и их смеси примерно в 1,2 раза. Если принять этот эффект во внимание, представленные в табл. 2 оценки растворимости увеличатся в среднем на 16 %.

ЭВОЛЮЦИЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА ОЗЕРА ВОСТОК

На основе полученных в предыдущем разделе оценок состава и предельной концентрации основных компонентов (N_2 и O_2) газовой смеси, растворенной в подледниковой воде, рассмотрим возможные сценарии эволюции общего газосодержания озера C_L и концентрации растворенных азота (z_{N_2}) и кислорода (z_{O_2}) по мере их аккумуляции в подледниковом водоеме. Определим величину C_L ($см^3г^{-1}$) как отношение общего количества газа, содержащегося в гидратной фазе и в растворе, к общей массе воды и газа в озере. Пренебрегая количеством газа, извлекаемого из озера в процессе образования озерного льда, запишем уравнение, определяющее изменение C_L во времени:

$$C_L = C_{MI}(1 + t/t_K), \quad (3)$$

где C_{MI} — общее содержание газа тающего ледникового льда ($C_{MI} = 0,090 \text{ см}^3г^{-1}$), t — время, а t_K — период времени, за который происходит полное обновление воды в озере. В стационарных условиях $t_K = M/m$, где M — масса воды в озере, а m — масса воды, намерзающей в единицу времени на ледяной потолок озера.

По условиям сценария II (см. выше), до момента начала гидратообразования в озере, общее газосодержание озерной воды равно сумме концентраций растворенных азота и кислорода: $C_L = z_{N_2} + z_{O_2}$ при $z_{N_2}/z_{O_2} = 3,7$. Первые гидраты, которые могут образовываться после достижения двухфазного равновесия системы раствор газа — гидрат (при $z_{N_2} = Z_{N_2}$ и $z_{O_2} = Z_{O_2}$), имеют состав $y_{N_2}/y_{O_2} = 5,3$, т.е. обогащены азотом по отношению к раствору. Следовательно, дальнейшее увеличение массы газового гидрата в процессе непрерывной аккумуляции газов в озере будет приводить к постепенному обеднению жидкой фазы азотом, увеличению концентрации растворенного кислорода и сдвигу состава гидратной фазы в сторону меньших значений y_{N_2}/y_{O_2} . Эволюция газового состава озерной воды по этому сценарию отображена на рис. 3, на котором время выражено числом циклов полного обновления воды в озере $\tau = t/t_K$. На графике видно, что число циклов τ_E необходимых для достижения состояния газового равновесия в озере, равно 29.

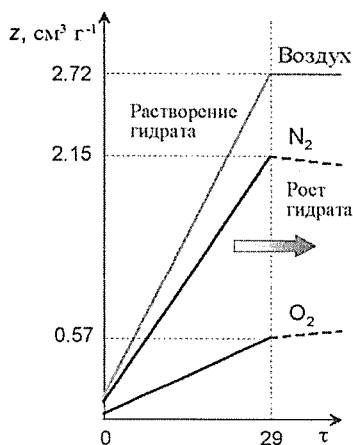


Рис. 3. Изменение концентрации (z) кислорода, азота и воздуха, растворенных в воде озера Восток, в процессе насыщения озера газами в результате массообмена между подледниковой водой и ледниковым покровом. Время (τ) выражено числом циклов полного обновления воды в озере.

По мере увеличения доли гидратной фазы в общем газосодержании озерной воды состав гидрата будет приближаться к составу питающего озеро атмосферного воздуха ($N_2/O_2 = 3,7$), а концентрации растворенных в воде газов — к предельным уровням, соответствующим сценарию III (см. табл. 2). При этом, на всем протяжении эволюции газового состава раствора, начиная с момента достижения первого равновесия по сценарию I, общая концентрация растворенных газов остается величиной практически постоянной: $z_{N_2} + z_{O_2} \approx 2,7 \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$.

Какова вероятность того, что озеро Восток достигло к настоящему времени двухфазного равновесия системы раствор газа — гидрат? Согласно данным, полученным с применением различных методов оценки периода обновления воды в озере, величина t_R должна находиться в пределах от 5000 до 100000 лет [9, 13, 15, 26, 27, 33]. Это соответствует диапазону значений τ_E от 0,145 до 2,9 млн. лет. Учитывая, что общий возраст озера составляет порядка 15 млн. лет, можно заключить, что вероятность газового равновесия в озере весьма велика. Если это действительно так, то концентрация растворенного в воде озера Восток кислорода примерно в 30 раз превышает его концентрацию в перенасыщенных воздухом поверхностных антарктических озерах с многолетним ледяным покровом [32]. Такая среда является

уникальной в биологическом плане [10]. Она может оказать серьезное сдерживающее влияние на развитие жизни в озере [20] и потребует специальной адаптации обитающих здесь микроорганизмов [21].

Важно отметить, что приведенные выше оценки сделаны для равновесных условий и не учитывают возможные и даже весьма вероятные в исследуемой системе кинетические эффекты. Экспериментальные и теоретические исследования процесса трансформации газовых пузырьков в клатраты гидрата воздуха в антарктическом ледниковом покрове (см., например, работы [11, 3]) показали, что переходные процессы в условиях недостатка газовой фазы продолжаются в течение десятков тысяч лет. В подледниковом озере кинетические эффекты могут быть связаны с хорошо известным явлением самосохранения (перегрева) гидратов, т.е. возможностью длительного существования гидратов в метастабильной области за счет образования на их поверхности защитной пленки льда I_h [12]. Кроме этого, поскольку газовый состав поступающих из ледника в воду гидратов и состав газов, растворенных в воде, одинаковы (соответствуют $N_2/O_2 = 3,7$), а равновесный гидрату раствор должен быть относительно обогащен кислородом ($N_2/O_2 = 2,5$, см. табл. 1) при достаточном насыщении воды по азоту, на поверхности гидрата может образовываться гидратная пленка с отличным (обогащенным по азоту) составом газовых компонентов. Последующие за этим диффузионные процессы будут постепенно перестраивать гидрат и менять его газовый состав аналогично тому, как это происходит в переходной зоне ледникового покрова. Таким образом, сценарий I является лишь термодинамической идеализацией реального и, по-видимому, более сложного процесса установления равновесия между гидратом и раствором газов в подледниковом озере.

Действительно, если допустить обязательное растворение гидратов, поступающих в озеро, то после достижения газового равновесия гидраты должны вновь образовываться преимущественно в зоне намерзания воды, где и создается перенасыщение озера газами. Учитывая механизм образования озерного льда [27], можно предположить, что большая их часть будет захватываться в процессе льдообразования. Однако это не подтверждается результатами измерений общего газосодержания керна озерного льда и микроскопическими исследованиями шлифов (см. ниже). Последнее может свидетельствовать и о том, что озеро Восток еще не достигло состояния равновесия между растворенными газами и гидратом.

Несмотря на упрощенный характер приведенных выше теоретических построений, их результаты могут быть полезны для интерпретации экспериментальных данных, полученных в ходе газовых анализов керна озерного льда.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГАЗОВЫХ АНАЛИЗОВ КЕРНА ОЗЕРНОГО ЛЬДА

Измерение общего количества газа, содержащегося в образцах озерного льда, осуществлялось с помощью установки, реализующей барометрический метод определения газосодержания [18]. Барометрический метод основан на точном измерении давления и температуры воздуха, экстрагированного из ледяного образца в результате его плавления и медленного повторного замораживания в предварительно вакуумированной камере, объем которой известен с высокой степенью точности. Расчетная погрешность абсолютных значений газосодержания C , измеренных с помощью данной установки, составляет 0,6 % при уровне газосодержания $C = 10^{-1} \text{см}^3 \text{г}^{-1}$ (уровень, типичный для льда полярных ледников), 0,8 % при $C = 10^{-2} \text{см}^3 \text{г}^{-1}$, 5 % при $C = 10^{-3} \text{см}^3 \text{г}^{-1}$ и 40–50 % при $C = 10^{-4} \text{см}^3 \text{г}^{-1}$. Экспериментально установленная воспроизводимость измерений составляет 0,5 % [18]. Для образцов массой 20–25 г минимальная концентрация воздуха во льду, детектируемая данной измерительной системой, с вероятностью более 99 % не превышает $5 \cdot 10^{-5} \text{см}^3 \text{г}^{-1}$. Таким образом, если расчетное значение получается $C \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{см}^3 \text{г}^{-1}$, мы, строго говоря, не можем судить о присутствии следов газа в исследуемом ледяном образце.

Серия контрольных замеров газосодержания в образцах чистого монокристаллического льда, выращенного в лаборатории из деионизированной воды (скорость роста 10 мм в день), дала расчетные значения $C = (2 \pm 3) \cdot 10^{-5} \text{см}^3 \text{г}^{-1}$ ниже уровня чувствительности прибора.

Результаты измерений газосодержания ледникового и озерного льда в интервале глубин 3500–3623 м приведены на рис. 4а, б. Горизонтальные линии C и D показывают на графиках соответственно уровень чувствительности прибора и средний уровень расчетного содержания газа в искусственных монокристаллах льда. Данные, представленные на рис. 2, свидетельствуют о том, что на глубине примерно 3538 м залегает граница между ледниковым льдом атмосферного происхождения, с типичным для него уровнем газосодержания $0,09 \text{см}^3 \text{г}^{-1}$, и озерным льдом конжеляционного происхождения, газосодержание в котором на 1–4 порядка ниже. Толща озерного льда весьма неоднородна по содержанию газа.

Верхний слой озерного льда (1), залегающий в интервале 3538–3609 м, характеризуется повышенным и чрезвычайно изменчивым газосодержанием. Типичным для него является наличие видимых невооруженным глазом минеральных включений донных осадков озера. Количество включений варьирует от 1 до 30 на 1 метр керна диаметром 10 см. Предполагается, что этот слой озерного льда сформировался в узком мелком заливе озера, расположенном примерно в 50 км вверх по линии тока льда от станции

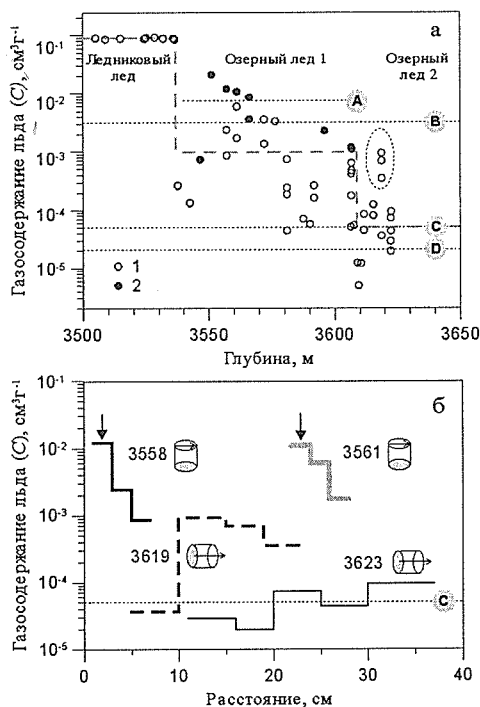


Рис. 4. Результаты измерений общего содержания газа в керне озерного льда из скважины 5Г-1.

a — Общее газосодержания льда (C) в интервале глубин 3500–3623 м в образцах чистого льда (1) и в образцах, содержащих видимые минеральные включения (2). Пунктир показывает средние уровни C в толще ледникового льда ($9,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3 \text{г}^{-1}$) и в слоях озерного льда 1 ($9,8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3 \text{г}^{-1}$) и 2 ($5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3 \text{г}^{-1}$), в образцах без минеральных включений. *A* — средний уровень C в образцах с минеральными включениями; *B* — расчетное значение газосодержания льда в равновесии с озерной водой, насыщенной атмосферными газами в присутствии гидрата воздуха; *C* — уровень чувствительности измерительной аппаратуры; *D* — средний уровень значений C , полученных для образцов чистого поликристаллического льда, выращенного в лаборатории. *b* — Примеры мелкомасштабной неоднородности озерного льда по общему содержанию газа в горизонтальном (керна №№ 3558 и 3561) и вертикальном (3619, 3623) направлениях. Стрелками показаны значения C , полученные на образцах льда, содержавших минеральные включения.

Восток. Скорость намерзания льда в этом заливе оценивается по радиолокационным данным в 40 мм год^{-1} [9].

Нижний слой озерного льда (2), прослеживается с 3609 м до забоя скважины на 3623 м и, по-видимому, продолжается до контакта ледника с

озером на глубине 3750 м [8]. Скорость его нарастания оценивается в 7–20 мм·год⁻¹ (минимальная скорость — под станцией Восток) [9]. Минеральные включения в этом слое не наблюдаются. Газосодержание озерного льда 2 существенно ниже и однородней, чем в слое 1.

Анализ результатов измерений изотопного состава (δD , $\delta^{18}O$) озерного льда позволил реконструировать основные особенности механизма его формирования [27]. В частности, было показано, что существенную роль в процессе нарастания льда играют кристаллы внутриводного льда, образующиеся при слабом переохлаждении (0,01–0,1 °С) талой воды, которая поднимается вдоль наклонной ледяной кровли озера из районов подледникового таяния на севере в направлении области намерзания льда на юге озера. Консолидация первоначально рыхлого слоя кристаллов внутриводного льда, скапливающихся у основания ледника, происходит в результате медленного замерзания вмещающей их воды. Согласно изотопным данным, объемные доли этих двух компонентов озерного льда примерно равны.

Данные, представленные на рис. 4а, свидетельствуют о том, что средний уровень газосодержания образцов льда, содержащих минеральные включения (уровень А), на порядок выше, чем в образцах чистого льда (ступенчатая пунктирная линия) в слое 1. Это приводит нас к заключению, что консолидация кристаллов внутриводного льда сопровождается захватом и последующим дозамерзанием жидких включений («водных карманов»). Объемная доля этих карманов в озерном льду 1 не превышает на момент завершения льдообразования 1 % [19]. В замерзших водных карманах концентрируются растворенные в озерной воде газы и химические примеси, а также находящиеся во взвеси минеральные частицы донных осадков и микробный материал. Поэтому, несмотря на малый объем «карманов», именно они определяют общую концентрацию примесей в озерном льду 1 и обуславливают пространственную неоднородность свойств этого льда, которую необходимо учитывать при разработке методов реконструкции состава воды озера по результатам изучения ледяного керна. Примеры мелкомасштабной пространственной неоднородности газосодержания озерного льда 1 в непосредственной близости от минеральных включений показаны на рис. 4б (образцы с глубин 3558 и 3561 м). На основании данных о количестве минеральных включений в озерном льду 1 [14] и с учетом массы образцов, использовавшихся для анализов, были рассчитаны весовые коэффициенты, позволившие более корректно определить среднее содержание газа в толще озерного льда 1. Оно составило $1,15 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$.

Проведенные нами микроскопические исследования шлифов озерного льда, в том числе и с минеральными включениями, не позволили

обнаружить присутствия во льду газовых гидратов. По-видимому, гидраты, которые должны образовываться на завершающей стадии замерзания водных карманов в результате роста концентрации растворенных газов в ядре кармана, перемешаны с минеральным веществом включений и поэтому неразличимы под микроскопом.

Распределение газосодержания в пределах толщи озерного льда 2 отличается достаточной однородностью. Об этом свидетельствуют данные, представленные на рис. 4а, а также результаты послойных измерений C , выполненных по керну льда с глубины 3623 м (рис. 4б). Исключение составляет 15-ти сантиметровый отрезок керна с горизонта 3619 м (см. рис. 4б), в пределах которого зафиксированы 3 аномально высокие для озерного льда 2 значения C . Повышенное газосодержание в отдельных образцах чистого льда отмечается также в слое озерного льда 1. Поэтому нельзя исключить возможность образования водных карманов, неассоциированных с минеральными включениями, в обоих слоях. При подсчете среднего уровня газосодержания льда глубже 3609 м указанные три значения (обведены овалом на рис. 4а) не учитывались. Среднее содержание газа в этой части толщи замерзшей озерной воды совпало с уровнем чувствительности прибора. Однако статистический анализ всех имеющихся замеров по данному интервалу керна показал, что значение $5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$ в данном случае действительно отражает средний уровень газосодержания льда.

Предварительный анализ состава газов, захваченных озерным льдом, свидетельствует о том, что в отдельных образцах, содержащих минеральные включения, наблюдаются повышенные (по отношению к составу атмосферного воздуха) концентрации таких газов как CO_2 , CH_4 и N_2O (Ж.Шапла, персональное сообщение). Вместе с тем, полученные данные подтвердили, что азот и кислород являются доминирующими газами в системе озера, так как вместе составляют 98 % от объема, содержащейся в озерном льду газовой смеси. Это позволяет применить наши теоретические разработки для интерпретации результатов анализов ледяных кернов.

Согласно приведенным выше расчетам, растворимость воздуха ($\text{N}_2 + \text{O}_2$) во льду в условиях трехфазного равновесия гидрат — лед — вода при температуре -3°C составляет $0,0032 \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$ и практически не зависит от состава газовой смеси в растворе (см. табл. 2). Данное значение (на рис. 4а ему соответствует уровень B) примерно в 2 раза меньше среднего содержания газа в образцах с минеральными включениями (уровень A), но в три раза превышает среднее газосодержание «чистого» льда (пунктир). Заметим, что уровень B соответствует нижней границе газосодержания льда при максимальной концентрации растворенных газов в озере (в равновесии с гидратом) и отвечает случаю бесконечно малой скорости роста кристалла льда, исклю-

чающей захват макроскопических примесей и/или образование водных карманов. Выше было показано, что, по крайней мере, в отношении озерного льда 1 это условие в озере не соблюдается и, следовательно, ожидаемое газосодержание льда в условиях равновесия с гидратом должно быть выше уровня *B*. Таким образом, данные по газосодержанию озерного льда 1 указывают на то, что в мелководном заливе озера Восток, где этот лед формируется, концентрация растворенных газов действительно высока, но ниже предельной, которая достигается при равновесии с гидратом.

Концентрация газов в озерном льду 2, который формировался в открытом озере, в 65 или более раз (здесь экспериментальные значения *C* близки к пределу чувствительности прибора) ниже уровня *B* (см. рис. 4а). Следовательно, вода, из которой он формировался — пусть даже путем очень медленного роста кристаллов льда — далека от насыщения. Используя описанный выше подход к оценке растворимости газов во льду, мы вычислили концентрацию водорастворенных газов, соответствующую равновесию системы раствор газа во льду — раствор газа в воде при низких (догидратных) уровнях насыщения воды газами. Расчетное значение газосодержания воды ($0,07 \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$) оказалось равным, в пределах вероятной ошибки метода (100 %), газосодержанию тающего ледникового льда. Отметим, что главный вывод нашего исследования: *верхний слой озера в районе станции Восток далек от состояния предельного насыщения газами*, останется в силе, даже если допустить предельную ошибку расчетов равную 500 %.

Новые данные, представленные в настоящей работе, могут свидетельствовать о значительной пространственной изменчивости параметров газового режима подледникового озера Восток. Последнее, в свою очередь, может отражать более сложные схемы циркуляции и перемешивания воды в озере и иную интенсивность массообмена между озером и ледником, чем те, которые предусматриваются существующими упрощенными моделями. Очевидно, что сделанные в работе предварительные выводы требуют тщательного осмысления и согласования их с имеющимися представлениями об изотопном балансе, периоде обновления озерной воды и стационарном гидрологическом режиме подледникового озера Восток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К моменту написания данной статьи были опубликованы только две работы, посвященные исследованиям газового режима подледникового озера Восток [19, 21]. На основе сложившихся представлений о существовании сбалансированного массообмена между озером и перекрывающим его ледником, исходя из предположения о достаточной продолжительности и интенсивности этого стационарного процесса и учитывая непростые термодинамические свойства газов в условиях высоких гидростатических дав-

лений, авторы указанных работ пришли к заключению о возможности [19] и даже большой вероятности [21] того, что озеро Восток к настоящему времени насыщено атмосферными газами (N_2 и O_2) до предельного уровня, определяемого равновесной растворимостью этих газов в присутствии гидрата. В теоретической части настоящего исследования мы повторили этот путь, несколько уточнив расчеты и выполнив их для двух сценариев с различными соотношениями N_2/O_2 в гидратной фазе и водном растворе. Полученные нами оценки (предельные концентрации растворенных газов $Z_{N_2} = 1,9\text{--}2,2 \text{ см}^3\text{г}^{-1}$, $Z_{O_2} = 0,6\text{--}0,8 \text{ см}^3\text{г}^{-1}$ и число циклов обновления воды, необходимое для достижения этого состояния, $\tau_E = 29$) в целом хорошо согласуются с уже опубликованными прогнозами [19, 21].

Новым шагом в изучении газовых параметров озера Восток в данной работе стала попытка реконструкции реальной концентрации газов, растворенных в подледниковой воде, по результатам газовых анализов керна озерного льда. Предварительные выводы, которые можно сделать по итогам проведенного исследования заключаются в следующем:

1. Концентрация растворенных газов (преимущественно N_2 и O_2) в мелководном заливе, где происходило формирование озерного льда 1, по-видимому, высока, но не достигает предельной.

2. Концентрация растворенных газов в основной части озера (в частности, под станцией Восток), где формировался слой озерного льда 2, весьма мало – вероятнее всего не более чем в два раза – отличается от концентрации газов в талой воде и, следовательно, концентрация растворенного кислорода близка к минимальному пределу ($0,019 \text{ см}^3\text{г}^{-1} = 27 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$), установленному нами в предыдущих работах [19, 20]. Похожий уровень концентрации растворенного O_2 наблюдается в перенасыщенных воздухом поверхностных антарктических озерах с многолетним ледяным покровом [32].

3. Потенциальная возможность образования (сохранения) клатратов гидратов воздуха в данном подледниковом водоеме, по-видимому, не реализуется.

Представленные выводы имеют большое значение для интерпретации результатов молекулярно-биологических и микробиологических исследований, проводимых по керну озерного льда. В плане дискуссии по поводу экологических рисков, связанных с готовящимся проникновением в озеро из скважины 5Г на станции Восток [31], полученные оценки концентрации растворенных газов не свидетельствуют о возможности мощной неуправляемой дегазации озерной воды через скважинную жидкость, которая обсуждалась в [21].

Подтверждение полученных нами результатов в ходе дальнейших исследований керна озерного льда и уточнения интерпретации уже имеющихся данных может потребовать пересмотра сложившихся представле-

ний о периоде обновления озерной воды, циркуляционном режиме и/или стационарном характере гидрологического режима подледникового озера Восток.

Работа выполнялась в рамках проекта «Провести комплексные исследования подледникового озера Восток, оценить прошлые изменения климата по данным ледяных кернов, колонок морских и озерных отложений» подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан» а также при финансовой поддержке РФФИ, грант 02-05-22002 НЦНИ_а. Газовые анализы керна осуществлялись в Лаборатории гляциологии и геофизики окружающей среды (ЛГГОС НЦНИ, г. Гренобль) в рамках российско-французского сотрудничества по исследованию озера Восток.

Поступила 14.10.2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зотиков И.А., Даксбери Н.С. О генезисе озера Восток (Антарктида) // Докл. РАН. —2000. —Т. 374, № 6. —С. 824—826. [Transl.: Zotikov I.A., Duxbury N.S. Genesis of Lake Vostok (Antarctica) // Doklady Earth Sciences. —2000. —Vol. 375, № 8. —P. 1294—1296].
2. Истомин В.А. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах сбора и промысловой обработки газа и нефти. —М.: ВНИИГАЗ, 1990. —214 с.
3. Истомин В.А. Термодинамика природного газа. —М.: ВНИИГАЗ, 1999. —105 с.
4. Истомин В.А., Квон В.Г. Методические указания по расчету фазовых равновесий газовых гидратов и предупреждению гидратообразования в системах добычи газа. —М.: ВНИИГАЗ, 1985. —124 с.
5. Кричевский Н.Р. Фазовые равновесия в растворах при высоких давлениях. —М.—Л.: Госхимиздат, 1952. —166 с.
6. Липенков В.Я., Барков Н.И., Мартинри П., Райно Д. Газосодержание ледяных отложений в районе станции Восток // Антарктика: Докл. комис. —1993. —Вып. 31. —С. 85—89.
7. Липенков В.Я., Барков Н.И., Саламатин А.Н. История климата и оледенения Антарктиды по результатам изучения ледяного керна со станции Восток // Пробл. Арктики и Антарктики. —2000. —Вып. 72. —С. 197—236.
8. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н., Попов С.В. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // Докл. РАН. —2001. —Т. 379, № 5. —С. 680—685.
9. Bell R.E., Studinger M., Tikku A.A., Clarke G.K.C., Gutner M.M., Meertens C. Origin and fate of Lake Vostok water frozen to the base of the East Antarctic ice sheet // Nature. —2002. —Vol. 416. —P. 307—310.
10. Bulat S.A., Alekhina I.A., Lipenkov V.Ya., Leitchenkov G.L., Raynaud D., Petit J.R. Limitations for life in Lake Vostok, Antarctica // EGS—AGU—EUG Joint Assembly: Geophysical Research Abstracts. —2003. —Vol. 5. —Abstract 03288.

11. Ikeda T., Salamatina A.N., Lipenkov V.Ya., Hondoh T. Diffusion of air molecules in polar ice sheets // Physics of ice core records. —Sapporo (Hokkaido University Press), 2000. —P. 393–421.
12. Istomin V.A. On possibility of superheating of natural gas hydrates and other aqueous crystalline structures // Russian Journal of Physical Chemistry. —1999. —Vol. 73, № 11. —P. 1887–1890.
13. Jean-Baptiste P., Petit J.R., Lipenkov V.Ya., Raynaud D., Barkov N.I. Constraints on hydrothermal processes and water exchange in Lake Vostok from helium isotopes // Nature. —2001. —Vol. 411. —P. 460–462.
14. Jouzel J., Petit J.R., Souchez R., Barkov N.I., Lipenkov V.Ya., Raynaud D., Stievenard M., Vassiliev N.I., Verbeke V., Vimeux F. More than 200 meters of lake ice above subglacial lake Vostok, Antarctica // Science. —1999. —Vol. 286. —P. 2138–2141.
15. Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G. de Q., Siegert M.J., Zotikov I.A. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // Nature. —1996. —Vol. 381. —P. 684–686.
16. Leitchenkov G.L., Masolov V.N., Lukin V.V., Bulat S.A., Kurinin R.G., Lipenkov V.Ya. Geological nature of subglacial Lake Vostok // EGS-AGU-EUG Joint Assembly: Geophysical Research Abstracts. —2003. —Vol. 5. —Abstract 03433.
17. Lipenkov V.Ya. Air bubbles and air-hydrate crystals in the Vostok ice core // Physics of ice core records. —Sapporo (Hokkaido University Press), 2000. —P. 327–358.
18. Lipenkov V.Ya., Candaudap F., Ravoire J., Dulac E., Raynaud D. A new device for air content measurements in polar ice // J. Glaciol. —1995. —Vol. 41, № 138. —P. 423–429.
19. Lipenkov V.Ya., Istomin V.A. On the stability of air clathrate-hydrate crystals in subglacial lake Vostok, Antarctica // Mater. Glyatsiol. Issled. —2001. —Vol. 91. —P. 138–149.
20. Lipenkov V., Istomin V., Bulat S., Raynaud D., Petit J.R. An estimate of the dissolved oxygen concentration in subglacial Lake Vostok // EOS, Transactions AGU (Spring Meeting Suppl.). —2002. —Abstract B21A-06. —Vol. 83, № 19. —P. S8788.
21. McKay C.P., Hand K.P., Doran P.T., Andersen D.T., Priscu J.C. Clathrate formation and the fate of noble and biologically useful gases in Lake Vostok, Antarctica // Geophysical Res. Letters. —2003. —Vol. 30, № 13. —P. 1702–1705.
22. Miller S.L. Clathrate hydrates of air in Antarctic ice // Science. —1969. —Vol. 165, № 3892. —P. 489–490.
23. Salamatina A.N. Paleoclimatic reconstructions based on borehole temperature measurements in ice sheets. Possibilities and limitations // Physics of ice core records. —Sapporo (Hokkaido University Press), 2000. —P. 243–282.
24. Salamatina A.N., Lipenkov V.Ya., Ikeda-Fukazawa T., Hondoh T. Kinetics of air-hydrate nucleation in polar ice sheets // Journal of Crystal Growth. —2001. —Vol. 223. —P. 285–305.
25. Salamatina A.N., Petit J.R., Lipenkov V.Ya. An estimate of LV isolation time from a sensitivity experiment for the melting area // EGS-AGU-EUG Joint Assembly: Geophysical Research Abstracts. —2003. —Vol. 5. —Abstract 08277.
26. Siegert M.J., Tranter M., Ellis-Evans J.C., Priscu J.C., Lyons W.B. The hydrochemistry of lake Vostok and the potential for life in Antarctic subglacial lakes // Hydrological processes. —2003. —Vol. 17. —P. 795–814.

27. *Souchez R., Jean-Baptiste P., Petit J.R., Lipenkov V.Ya., Jouzel J.* What is the deepest part of the Vostok ice core telling us? // *Earth-Science Review*. —2002. —№60. —P. 131–146.
28. *Subglacial Lake Exploration. SCAR Workshop Report and Recommendations.* —Cambridge, 1999. —26 p.
29. *Takeya S., Nagaya H., Matsuyama T., Hondoh T., Lipenkov V.Ya.* Lattice constants and thermal expansion coefficient of air clathrate hydrate in deep ice cores from Vostok, Antarctica // *J. of Physical Chemistry B*. —2000. —Vol. 104, №4. —P. 668–670.
30. *Van der Waals J.H., Platteeuw J.C.* Clathrate solutions // *Adv. Chem. Phys.* —1959. —Vol. 2, №1. —P. 1–57.
31. *Verkulich S.R., Kudryashov B.B., Barkov N.I., Vasiliev N.I., Vostretsov R.N., Dmitriev A.N., Zubkov V.M., Krasilev A.V., Talalay P.G., Lipenkov V.Ya., Savatyugin L.M., Kuz'mina I.N.* Proposal for penetration and exploration of sub-glacial Lake Vostok, Antarctica // *Mem. Natl Inst. Polar Res. (Proc. of the Fifth Int. Workshop on Ice Drilling Technology, Nagaoka, 30 October – 1 November 2000)*. —2002. —Spec. Issue 56. —P. 245–252.
32. *Wharton R.A. Jr., McKay C.P., Simmons G.M. Jr., Parker B.C.* Oxygen budget of a perennially ice-covered Antarctic lake // *Limnology and Oceanography*. —1986. —Vol. 31. —P. 437–443.
33. *Wuest A., Carmack E.* A priori estimates of mixing and circulation in the hard-to-reach water body of Lake Vostok // *Ocean Modelling*. —2000. —№ 2. —P. 29–43.

С.А.Булат, Л.П.Васильева, Ж.Р.Пети, В.В.Лукин, И.А.Алехина

МОЛЕКУЛЯРНО-БИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОГО СОСТАВА ЖИДКОСТИ ДЛЯ БУРЕНИЯ ИЗ СКВАЖИНЫ 5Г-1, СТАНЦИЯ ВОСТОК, АНТАРКТИДА

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особый интерес в биологии представляет поиск форм микробной жизни в любых экстремальных, особенно, сверх-горячих или супер-холодных условиях местообитания. В первую очередь, это связано с установлением предельных условий и эконизш существования самой жизни, чтобы знать, в каких пределах физико-химических условий можно искать жизнь вне Земли. Известно, например, что некоторые штаммы *Archaea* могут выдерживать автоклавирувание (121°C при одной атмосфере), т.е. стандартную процедуру стерилизации [34], а бактерии могут жить в переохлажденных облаках и поверхностном снеге на Южном полюсе при температурах до -17°C [13, 50]. Вопрос «А если ли жизнь на Марсе?» всегда волновал человечество, но только сейчас средства биотехнологического эксперимента совместно с информатикой и успехами в исследовании Космоса позволяют сделать астро- или экзобиологию полноценной наукой [37], подтверждением чему служит начало издания пару лет назад сразу двух международных астробиологических журналов — один в США, а другой в Великобритании.

Вместе с тем, значим и биотехнологический аспект данной проблемы, ибо новые организмы (их способ жизни, ферменты и продукты жизнедеятельности) могут быть затребованы (и успешно освоены) практикой фармакологии, медицины и промышленности.

Однако, поиск жизни в условиях, где ее трудно предположить, например, на других планетах, почти всегда сопряжен с проблемой внешнего загрязнения — прямой контаминацией жизнью (организмами) с Земли

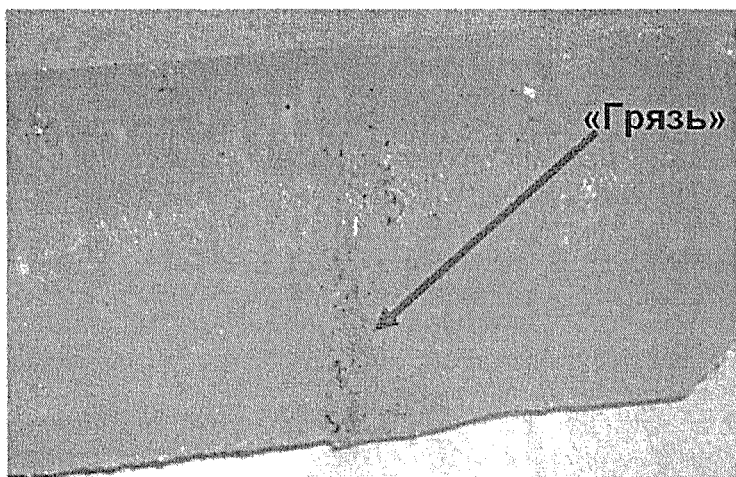


Рис. 1. Пример загрязнения керна льда буровой жидкостью.
Показан керн атмосферного льда с глубины 2054 м,
извлеченный из полиэтиленового рукава.

[49]. В таких условиях жизнь, если и существует, то часто едва «теплится», и скорость метаболических процессов и, следовательно, микробная биомасса ожидаются ничтожными (как, к примеру, имеет место в поверхностном снеге на Южном полюсе [13]).

Именно с труднопреодолимой проблемой загрязнения нам пришлось столкнуться, изучая молекулярными методами микробное содержание керна льда со станции Восток, Антарктида. Лед обоих типов, ледникового и озерного происхождения, оказался настолько чистым, что фактически не содержит ДНК и клеток, пригодных для анализа. Подавляющее большинство обнаруженных нами по ДНК бактерий оказались контаминантами [2, 11, 12]. Это противоречит ранее опубликованным данным, согласно которым содержание микробных клеток в кернах льда Восток составляет 100–1000 и более в мл воды [4, 5, 15, 16, 33, 40]. Различие в данных может объясняться тем, что мы в своей работе использовали жесткие условия предотвращения и/или контролирования контаминации: суперчистые помещения и воду для деконтаминации и обработки образцов льда, а также множественные биологические контроли для подтверждения находок. Одним из таких контролей послужил бактериальный состав оригинальной жидкости [7], используемой для бурения скважины 5Г-1 на станции Восток. Данная жидкость, представляющая смесь авиационного ке-

росина и фреона, и поэтому с большим трудом удаляемая с поверхности керна льда (особенно, из микротрещин), с явной очевидностью может представлять один из источников внешней контаминации при изучении микробного содержания во льду (рис. 1).

Обусловлено это, не в последнюю очередь ее исходной химической неоднородностью, выражающейся как в цветовой гамме образцов (рис. 2), так и их химической агрессивности (например, некоторые образцы растворяли пластик), а также условиями транспортировки в Антарктиду в цистернах различного назначения. Кроме того, манипуляции с керосином и фреоном на станции Восток далеки от чистоты и, тем более, стерильности, ибо исходная задача для бурения скважины не предусматривала соблюдение условий, необходимых для проведения молекулярно-биологических исследований керна льда.

Химический состав заливочной жидкости скважины 5Г-1 представляет собой сложную смесь в основном насыщенных углеводородов с длинной цепи в ранге 9-16 (разные типы авиакеросинов ТС-1, JET-A и т.д.) и фреонов (4 и 141В) в соотношении в среднем 5:1. При этом, авиакеросины могут содержать разветвлённые и ароматические углеводороды и нафталены, а фреон привносит фтордихлорэтан. Учитывая многолетнюю историю формирования реальной смеси в стволе скважины и низкие температуры окружающей среды, подобная смесь практически не может быть смоделирована в лабораторных условиях. Таким образом, изучение микробного разнообразия оригинальной заливочной жидкости, взятой с различных горизонтов скважины, представляет собой уникальное исследование. Аналогичных работ нам не известно.

ЧТО МЫ ЗНАЕМ О БАКТЕРИЯХ, ДЕГРАДИРУЮЩИХ КЕРОСИН И ДРУГИЕ ПРОДУКТЫ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

Многие микроорганизмы (в основном, бактерии) способны деградировать (метаболизировать) насыщенные и ароматические углеводороды нефти и продуктов ее переработки и сопутствующие серосодержащие соединения. Целый ряд примеров приведен в таблице 1. Отметим, что все включенные в данные таблицы литературные источники содержат молекулярную идентификацию бактерий (по 16S рибДНК), тогда как более ранние микробиологические работы детально рассмотрены в обзоре E. Rosenberg [48].

Среди этих бактерий непосредственно в нефти и ее продуктах наиболее изучены представители сульфат-редуцирующих бактерий из семейства *Desulfobacteriaceae* (отдел Дельтапротеобактерии) [42], а также бактерии, восстанавливающие серу до сероводорода из отдела *Actinobacteria* и группы *Bacillus/Clostridium* (отдел *Firmicutes*) [21, 44], а также из семейства *Thermotogaceae* (отдел *Thermotogae*) [26] (табл. 1).

**Таксономия бактерий (по Bergey 2001 [22]),
деградирующих нефть и продукты ее переработки в различных эконишах**

Организмы, деградирующие углеводороды нефти в:			
нефти и ее продуктах непосредственно	почве	пресной воде и осадках	морской воде и осадках
<i>Alphaproteobacteria</i>			
	<u><i>Sphingomonadaceae</i></u> <i>Sphingomonas</i> sp [6, 9, 51, 57] <u><i>Rhodospirillaceae</i></u> <i>Azospirillum brasilense</i> [20]	Неизвестные представители [19]	
<i>Betaproteobacteria</i>			
	<u><i>Neisseriaceae</i></u> Родственные <i>Aquaspirillum</i> sp [20]	<u><i>Rhodocyclaceae</i></u> <i>Azoarcus</i> sp [27] Неизвестные представители [19]	Неизвестные представители [3]
<i>Gammaproteobacteria</i>			
	<u><i>Pseudomonadaceae</i></u> <i>Pseudomonas stutzeri</i> [20] <i>Pseudomonas</i> sp [6, 9, 24, 51, 55, 57] <u><i>Xanthomonadaceae</i></u> <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> [10]		<u><i>Alcanivoraxaceae</i></u> <i>Alcanivorax vortex</i> [30] <u><i>Piscirickettsiaceae</i></u> <i>Cycloclasticus spirillum</i> [17] <i>(C. pugetii, C. sp)</i> [23, 30] <u><i>Halomonadaceae</i></u> <i>Halomonas</i> [36]

Организмы, деградирующие углеводороды нефти в:			
нефти и ее продуктах непосредственно	почве	пресной воде и осадках	морской воде и осадках
<i>Gammaproteobacteria</i>			
			<u><i>Vibrionaceae</i></u> <i>Vibrio</i> [36] <u><i>Alteromonadaceae</i></u> <i>Pseudoalteromonas</i> [36] <u><i>Oceanospirillaceae</i></u> <i>Marinomonas</i> [36] <i>Neptunomonas naphthovorans</i> [28, 36] Неизвестные представители [19]
<i>Deltaproteobacteria</i>			
<u><i>Desulfobacteriaceae</i></u> [42]		<u><i>Syntrophaceae</i></u> <i>Syntrophus spp</i> [19] Неизвестные представители [19]	<u><i>Desulfobacteriaceae</i></u> Родственные <i>Desulfosarcina</i> , <i>Desulfonema</i> , и <i>Desulfococcus</i> [52]
<i>Actinobacteria</i>			
<u><i>Nocardiaceae</i></u> <i>Rhodococcus erythropolis</i> [21]	<u><i>Nocardiaceae</i></u> <i>Rhodococcus erythropolis</i> (<i>R. globerulus</i>) [14, 38] <i>Rhodococcus sp.</i> [24] <u><i>Mycobacteriaceae</i></u> <i>Mycobacterium sp</i> [9, 57]		<u><i>Nocardiaceae</i></u> <i>Rhodococcus spp</i> [46] <i>R. rhodochrous</i> [30]
<i>Firmicutes</i>			
<u><i>Syntrophomonadaceae</i></u> <i>Anaerobaculum thermoterrnum</i> [44]	<u><i>Paenibacillaceae</i></u> <i>Paenibacillus spp</i> [35]		<u><i>Paenibacillaceae</i></u> <i>Paenibacillus naphthalenovorans</i> [18]

Организмы, деградирующие углеводороды нефти в:			
нефти и ее продуктах непосредственно	почве	пресной воде и осадках	морской воде и осадках
<i>Firmicutes</i>			
		<i>Peptococcaceae</i> <i>Desulfosporosinus meridiei</i> [47] Неизвестные представители [19]	
<i>Thermotogae</i>			
<i>Thermotogaceae</i> <i>Thermosipho geolei</i> [25, 26] <i>Petrotoga olearia</i> , <i>P.</i> <i>sibirica</i> [25, 26]			
<i>Bacteroidetes</i>			
		Неизвестные представители [19]	Неизвестные представители [3]
<i>Acidobacteria</i>			
			Неизвестные представители [3]
<i>Cyanobacteria</i>			
			Неизвестные представители [3]
<i>Verrucomicrobia</i>			
		Неизвестные представители [19]	Неизвестные представители [3]
OP5, OP8, OP10 и OP11 Candidate Divisions			
		Неизвестные представители [19]	Неизвестные представители (OP10) [3]
WS1-WS6 Candidate Divisions			
		Неизвестные представители [19]	
Неизвестно			
		Неизвестные представители [19]	<i>Lutibacterium anuloderans</i> [17] Неизвестные представители [3]

В загрязненных продуктах нефти почвах доминируют представители родов *Sphingomonas* и *Pseudomonas* [6, 9, 20, 51, 57] (табл. 1). Напротив, в загрязненных пресноводных (грунтовых) и морских водоемах и осадках можно встретить, в принципе, бактерии из любых отделов, хотя Гаммапротеобактерии, исключая *Pseudomonas* кажется, более присущи морским водоемам (табл. 1).

Вышеприведенная специфичность бактериального состава показывает, что в различных экосистемах, где присутствует керосин, встречаются и доминируют разные бактерии, за исключением, по-видимому, повсеместно присутствующих видов рода *Rhodococcus*. Что касается бактерий, которые можно ожидать встретить в жидкости для бурения со станции Восток, то трудно предсказать, какому из списков они будут более соответствовать, тем более, что изученность бактериального разнообразия пока еще очень далека от полноты [8]. Вдобавок, многие бактерии представлены пока только ДНК клонками и имеют неутвержденный статус типа Candidate Division (табл. 1)

МОЛЕКУЛЯРНО-БИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОГО РАЗНООБРАЗИЯ ЖИДКОСТИ ДЛЯ БУРЕНИЯ СО СТАНЦИИ ВОСТОК

Десять образцов заливочной жидкости из скважины Восток, отобранных 47-й РАЭ непосредственно из скважины в интервале глубин 110–3600 м, были доставлены при –20°С в лабораторию для анализа.

Вначале образцы предполагалось отфильтровать через фильтры с размером пор 3000 дальтон (Microcon YM-3, Millipore, США), собрав, тем самым, все клетки и даже свободную ДНК. Однако эта схема эксперимента, оказавшаяся высокоэффективной для воды из льда, оказалась неработающей. Буровая жидкость, состоящая, как известно, из смеси керосина и фтордихлорэтана, содержит невидимую глазом фракцию, которая образует «клейкую» пленку, полностью блокирующую поры использованных фильтров. Поэтому нами была разработана новая методика извлечения из буровой жидкости присутствующих в ней клеток. Она заключается в экстракции клеток и ДНК из смеси керосин–вода в водную фракцию в ходе длительного перемешивания с последующим отделением и отбором этой воды на анализ. В результате из шести образцов, отобранных из всего диапазона глубин (110 м – 3600 м) (рис. 2), была успешно выделена ДНК и затем амплифицирована в ПЦР.

На основе анализа 31 клон рибДНК, полученных для четырех образцов буровой жидкости с глубин 110, 2750, 3400 и 3600 м, было всего выявлено восемь видов бактерий (табл. 2) [7]. Среди них доминирующими оказались представители обширного рода *Sphingomonas* из Альфапротеобактерий (4 вида). Для целого ряда штаммов и видов *Sphingomonas* показано, что они ус-

Бактерии, обнаруженные в образцах жидкости для бурения со станции Восток

Таксон (отдел, филум)	Свойства (ссылка)*	Глубина скважины (м) Локальная температура (°C) Число клонов (шт.)				
		Атмосферный лед			Озерный лед	
		110 -57°C 5	2750 -23°C 0**	3400 -10°C 15	3600 -6°C 11	
Альфапротеобактерии						
<i>Sphingomonas natatoria</i>	Образует биопленки. Обладает высокой агрегирующей способностью [44]. Не может деградировать ароматические углеводороды керосина [29]; данные по деградации алифатических углеводородов отсутствуют.			+	(13)	
<i>Sphingomonas adhaesiva</i> (D16146)	Обладает высокой адгезивной способностью; выделен из УФ-облученной воды [56]. Данные по деградации керосина отсутствуют				+	(3)
<i>Sphingomonas</i> sp. (группа клонов-штаммов <i>Sph. aurantiaca</i>)	Деградирует керосин (например, штамм Ant20 (AF184221) [6]				+	(2)
<i>Sphingomonas</i> sp. V1 (AF324199)	Штамм выделен из керна озерного льда Востока с глубины 3593м [15]. Данные по деградации керосина отсутствуют				+	(1)
Гаммапротеобактерии						
97% родства с <i>Haemophilus influenzae</i>	Патоген человека [41]	±				(1)

Окончание табл. 2.

Таксон (отдел, филум)	Свойства (ссылка)*	Глубина скважины (м) Локальная температура (°C) Число клонов (шт.)			
		Атмосферный лед			Озерный лед
		110 -57°C 5	2750 -23°C 0**	3400 -10°C 15	3600 -6°C 11
<i>Bacteroidetes</i> 96% родства с <i>Haloanella gallinarum</i> (син. <i>Amoebinatus massiliae</i>) (AY244776, AY204874)	<u>Патоген человека</u>				± (5)
Неизвестные/Некультивируемые					
Неизвестный вид, представленный клоном некультивируемой бактерии DIC-74 (AF544866)	<u>Клон выделен из, по-видимому, здоровых тканей больного Карибского коралла [39]</u>	± (4)			
Неизвестный вид, представленный двумя клонами***:				+	(2)
1. Некультивируемая бактерия, клон wt0198	1. Ризосфера рапса [31]				
2. Некультивируемая бактерия, клон MB-B2-105	2. Глубоководные осадки впадины Нанкай, Япония [43]				

Примечания: * — статья или номер по международной базе данных (GenBank); ** — образец с данной глубины не выявил ни одной достоверной находки при сравнении с библиотекой контаминантов (данные не приведены); *** — равновероятностные варианты; патогены-сапрофиты человека и животных выделены подчеркиванием.

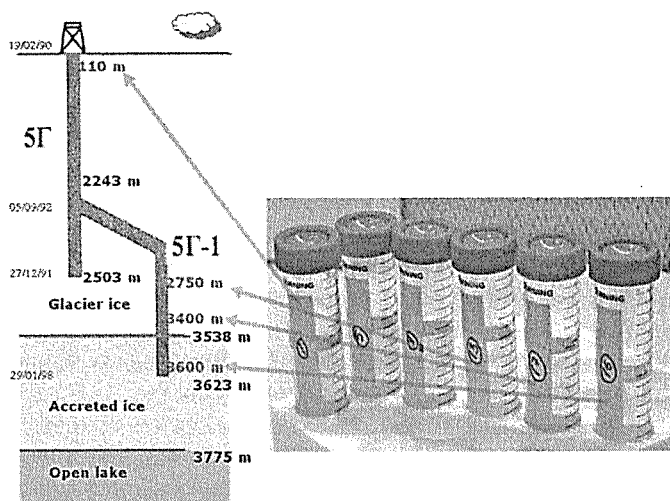


Рис. 2. Образцы буровой жидкости, отобранные с различных глубин из скважины 5Г-1.

ваивают углеводороды нефти [32] или могут способствовать их усвоению благодаря высокой агрегирующей способности [45]. В нашем случае выявленные виды и штаммы, к сожалению, еще не тестированы на способность деградировать компоненты керосина и поэтому их статус остается неопределенным (табл. 2). Три других вида (из разных отделов) показали родство с патогенами-сапрофитами человека или животных, и еще один вид однозначно идентифицировать не удалось (табл. 2). Выявленные клоны патогенов-сапрофитов человека и животных, а также почвенных бактерий (табл. 2), могли быть привнесены в жидкость для бурения как на стадиях ее формирования и заливки, так и при отборе образцов или экстракции из них ДНК.

Кроме того, в образцах с глубин 110 и 2750 м были выявлены один и два, соответственно, рибДНК клона из группы бактерий *Sphingomonas paucimobilis* — хорошо изученного вида, метаболизирующего углеводороды нефти и другую органику [например, 32]. Однако, в связи с тем, что эта же бактерия была нами обнаружена в других контролях (например, лабораторная пыль), данные клоны не могли быть однозначно приписаны изученным образцам керосина.

Интересно отметить, что три из обнаруженных нами в керосине бактерий — *Sphingomonas sp.* из группы *Sph. aurantiaca*, *Sphingomonas sp.* V1 и *Sphingomonas natatoria*, при анализе мировых баз данных оказались иден-

тичными (или родственными в пределах вида) бактериям, обнаруженным в озерном льду со станции Восток (глубина 3593 м), а также в леднике Купол Тейлора из другого района Антарктики [15, 16]. Кроме того, *Sphingomonas sp.* была также выделена из загрязненных авиационным керосином почв рядом с Базой Скотта в Антарктике [6]. Это означает, что проанализированные Б. Кристнером образцы льда керна со станции Восток и с Купола Тейлора содержали остатки буровой жидкости и, следовательно, контаминанты.

В результате проведенного исследования можно заключить, что буровая жидкость с разных горизонтов содержит бактерии различного происхождения, как «вездесущие и всеядные» сфингомонады, так и патогены человека и животных. Интересно, что образцы даже близких горизонтов (3400 и 3600 м) различались по видовому составу (табл. 2). По нашему предположению объяснением этому могут служить температурные условия в скважине [1 и др.] (табл. 2). Так, преобладание сфингомонад в глубоких горизонтах можно объяснить сравнительно высокой локальной температурой ($-10 \div -6$ °C), при которой бактерии, как показано [13], могут с успехом жить, т.е. метаболизировать. Напротив, отсутствие эндогенной микрофлоры в самом верхнем (110 м) и промежуточном (2750 м) горизонтах может быть обусловлено чрезвычайно низкой температурой ($-57 \div -23$ °C). Встреченные же повсеместно патогены-сапрофиты человека и животных могут быть не связаны со скважиной и, скорее всего, представляют внешнее загрязнение. Полное представление о микробном составе жидкости для бурения, особенно в наиболее глубоких горизонтах — важных с точки зрения возможного воздействия на экологию-биоту озера Восток при проникновении в него бурильного снаряда, требует дальнейшего исследования.

Следует отметить, что впервые проведенный анализ оригинальной буровой жидкости позволил уточнить истинное происхождение некоторых бактерий, найденных нами во льду, и даже показать, что находки, ранее сделанные другими исследователями, могут представлять загрязнение. Как следствие этого, можно заключить, что удаление остатков буровой жидкости (и, следовательно, привносимых с ней микробов) с керна льда представляет достаточно сложную проблему [53, 54], которую мы планируем решить с помощью нового метода деконтаминации льда с использованием озона. Этот новый подход заключается не в удалении жидкости, загрязняющей поверхность керна, а в ее стерилизации, включая разрушение ДНК.

В заключение отметим, что результаты проведенной нами работы с жидкостью для бурения однозначно демонстрируют необходимость создания международной базы данных по микробному содержанию жидкостей,

используемых для глубокого бурения льда, предназначенного для биологических исследований.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Мировой океан» (подпрограмма «Изучение и исследование Антарктики») и гранта РФФИ 02-04-22003 НЦНИ-а и была поддержана грантами CNRS (GEOMEX) и CNES, Франция.

Поступила 24.10.2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барков Н.И., Вострецов Р.Н., Липенков В.Я., Саламатин А.Н. Колебания температуры воздуха и осадков в районе станции Восток на протяжении четырех климатических циклов за последние 420 тыс лет // Арктика и Антарктика. —2002. —Т. 35. —С. 82—89.
2. Булат С.А., Алехина И.А., Крыленков В.А., Лукин В.В. Молекулярно-биологические исследования микробиоты подледникового озера Восток, Антарктика // Успехи современной биологии. —2002. —Т. 122. —С. 211—221.
3. Abed R.M.M., Safi N.M.D., Kuster J., de Beer D., El-Nahhal Y., Rullkötter J., Garcia-Pichel F. Microbial diversity of a heavily polluted microbial mat and its community changes following degradation of petroleum compounds // Appl. Environ. Microbiol. —2002. —Vol. 68. —P. 1674—1683.
4. Abyzov S.S. Microorganisms in the Antarctic ice // Antarctic Microbiology. —1993. —P. 265—295.
5. Abyzov S.S., Mitskevich I.N., Poglazova M.N., Barkov N.I., Lipenkov V.Ya., Bobin N.E., Koudryashov B.B., Pashkevich V.M., Ivanov M.V. Microflora in the basal strata at antarctic ice core above the Vostok Lake // Adv. Space Res. —2001. —Vol. 28. —P. 701—706.
6. Aislabie J., Foght J., Saul D. Aromatic hydrocarbon-degrading bacteria from soil near Scott Base, Antarctica // Polar Biol. —2000. —Vol. 23. —P. 183—188.
7. Alekhina I.A., Petit J.R., Lukin V.V., Bulat S.A. Bacterial study of Vostok drilling fluid: A tool to make ice core findings confident // Geophysical Research Abstracts. EGS —AGU —EUG Joint Assembly, Nice, France. —2003. —Vol. 5. —No. 03273.
8. Amann R.I., Ludwig W., Schliefer K.H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation // Microbiol. Rev. —1995. —Vol. 59. —P. 143.
9. Bastiaens L., Springael D., Wattiau P., Harms H., Dewachter R., Verachtert H., Diels L. Isolation of adherent polycyclic aromatic hydrocarbon PAH-degrading bacteria using PAH-sorbing carriers // Appl. Environ. Microbiol. —2000. —Vol. 66. —P. 1834—1843.
10. Boonchan S., Britz M.L., Stanley G.A. Degradation and mineralization of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by defined fungal-bacterial cocultures // Appl. Environ. Microbiol. —2000. —Vol. 66. —P. 1007—1019.
11. Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot M., Petit J.-R., Waggenbach D., Lipenkov V.V., Raynaud D., Lukin V.V. Thermophiles Microbe Signature in Lake Vostok, Antarctica // Eos. Trans. AGU. —2002. —Vol. 83. Spring Meet. Suppl. —Abstract B21A-09.
12. Bulat S.A., Alekhina I.A., Lipenkov V.Ya., Leitchenkov G.L., Raynaud D., Petit, J.-R. Limitations for life in Lake Vostok, Antarctica // EGS—AGU—EUG Joint Assembly. —2003. (Nice, France, April 2003, European Geophysical Society 2003, Geophysical Research Abstracts.) —Vol. 5. —Abstract 03288.

13. Carpenter E.J., Lin S., Capone D.G. Bacterial activity in South Pole snow // Appl. Environ. Microbiol. —2000. —Vol. 66. —P. 4514–4517.
14. Castorena G., Suarez C., Valdez I., Amador G., Fernandez L., Le Borgne S. Sulfur-selective desulfurization of dibenzothiophene and diesel oil by newly isolated *Rhodococcus* sp. strains // FEMS Microbiol. Lett. —2002. —Vol. 215. —P. 157–161.
15. Christner B.C., Mosley-Thompson E., Thompson L.G., Reeve J.N. Isolation of bacteria and 16S rDNAs from Lake Vostok accretion ice // Environ. Microbiol. —2001. —Vol. 3. —P. 570–577.
16. Christner B.C. Detection, recovery, isolation and characterization of bacteria in glacial ice and Lake Vostok accretion ice. PhD. Thesis. Ohio State University. —2002. —194 p.
17. Chung W.K., King G.M. Isolation, characterization and polyaromatic hydrocarbon degradation potential of aerobic bacteria from marine macrofaunal burrow sediments and description of *Lutibacterium anuloderans* gen. nov., sp. nov., and *Cyclocasticus spirillensus* sp. nov. // Appl. Environ. Microbiol. —2001. —Vol. 67. —P. 5585–5592.
18. Daane L.L., Harjono I., Barns S.M., Launen L.A., Palleroni N.J., Haggblom M.M. PAH-degradation by *Paenibacillus* spp. and description of *Paenibacillus naphthalenovorans* sp. nov., a naphthalene-degrading bacterium from the rhizosphere of salt marsh plants // Int. J. Syst. Evol. Microb. —2002. —Vol. 52. —P. 131–139.
19. Dojka M.A., Hugenholtz P., Haack S.K., Pace N.R. Microbial diversity in a hydrocarbon-and chlorinated-solvent-contaminated aquifer undergoing intrinsic bioremediation // Appl. Environ. Microbiol. —1998. —Vol. 64. —P. 3869–3877.
20. Eckford R., Cook F.D., Saul D., Aislabie J., Foght J. Free-living heterotrophic nitrogen-fixing bacteria isolated from fuel-contaminated Antarctic soils // Appl. Environ. Microbiol. —2002. —Vol. 68. —P. 5181–5185.
21. Folsom B.R., Schieche D.R., Digrazia P.M., Werner J., Palmer S. Microbial desulfurization of alkylated dibenzothiophenes from a hydrodesulfurized middle distillate by *Rhodococcus erythropolis* // Appl. Environ. Microbiol. —1999. —Vol. 65. —P. 4967–4972.
22. Garrity G.M., Winters M., Searles D.B. Taxonomic outline of the Prokaryotic genera. Bergey's Manual of Systematic bacteriology. —2001. 2nd Ed. Springer Verlag NY Berlin Heidelberg.
23. Geiselbrecht A. D., Hedlund B.P., Tichi M.A., Staley J.T. Isolation of marine polycyclic aromatic hydrocarbon (pah)-degrading *Cyclocasticus* strains from the Gulf of Mexico and comparison of their PAH degradation ability with that of Puget Sound *Cyclocasticus* strains // Appl. Environ. Microbiol. —1998. —Vol. 64. —P. 4703–4710.
24. Greene E.A., Kay J.G., Jaber K., Stehmeier L.G., Voordouw G. Composition of soil microbial communities enriched on a mixture of aromatic hydrocarbons // Appl. Environ. Microbiol. —2000. —Vol. 66. —P. 5282–5289.
25. L'Haridon S., Miroshnichenko M.L., Hippe H., Fardeau M.L., Bonch-Osmolovskaya E., Stackebrandt E., Jeanthon C. *Thermosiphon geolei* sp. nov., a thermophilic bacterium isolated from a continental petroleum reservoir in Western Siberia // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. —2002. —Vol. 51. —P. 1327–1334.
26. L'Haridon S., Miroshnichenko M.L., Hippe H., Fardeau M.L., Bonch-Osmolovskaya E.A., Stackebrandt E., Jeanthon C. *Petrotoga olearia* sp. nov. and *Petrotoga sibirica* sp. nov., two thermophilic bacteria isolated from a continental petroleum reservoir in Western Siberia // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. —2002. —Vol. 52. —P. 1715–1722.

27. Hess A., Zarda B., Hahn D., Haner A., Stax D., Hohener P., Zeyer J. In situ analysis of denitrifying toluene- and m-xylene-degrading bacteria in a diesel fuel-contaminated laboratory aquifer column // Appl. Environ. Microbiol. —1997. —Vol. 63. —P. 2136–2141.
28. Hedlund B.P., Geiselsbrecht A.D., Bair T.J., Staley J.T. Polycyclic aromatic hydrocarbon degradation by a new marine bacterium, *Neptunomonas naphthovorans* gen. nov., sp. nov. // Appl. Environ. Microbiol. —1999. —Vol. 65. —P. 251–259.
29. Hiraishi A., Kuraishi H., Kawahara K. Emendation of the description of *Blastomonas natatoria* (Sly 1985) Sly and Cahill 1997 as an aerobic photosynthetic bacterium and reclassification of *Erythromonas ursincola* Yurkov et al. 1997 as *Blastomonas ursincola* comb. nov. // Int. J. Syst. Evol. Microb. —2000. —Vol. 50. —P. 1113–1118.
30. Iwabuchi N., Sunairi M., Urai M., Itoh C., Anzai H., Nakajima M., Harayama S. Extracellular polysaccharides of *Rhodococcus rhodochrous* S-2 stimulate the degradation of aromatic components in crude oil by indigenous marine bacteria // Appl. Environ. Microbiol. —2002. —Vol. 68. —P. 2337–2343.
31. Kaiser O., Puehler A., Selbitschka W. Phylogenetic analysis of microbial diversity in the rhizoplane of oilseed rape (*Brassica napus* cv. Westar) employing cultivation-dependent and cultivation-independent approaches // Microb. Ecol. —2001. —Vol. 42. —P. 136–149.
32. Kanaly R.A., Harayama S. Biodegradation of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria // J. Bacteriol. —2000. —Vol. 182. —P. 2059–2067.
33. Karl D.M., Bird D.F., Björkman K., Shackelford R., Houlihan T., Tupas L. Microorganisms in the accreted ice of Lake Vostok, Antarctica // Science. —1999. —Vol. 286. —P. 2144–2147.
34. Kashefi K., Lovley D.R. Extending the upper temperature limit for life // Science. —2003. —Vol. 301. —P. 934.
35. Konishi J., Ishii Y., Onaka T., Okumura K., Suzuki M. Thermophilic carbon-sulfur-bond-targeted biodesulfurization // Appl. Environ. Microbiol. —1997. —Vol. 63. —P. 3164–3169.
36. Melcher R.J., Apitz S.E., Hemmingsen B.B. Impact of irradiation and polycyclic aromatic hydrocarbon spiking on microbial populations in marine sediment for future aging and biodegradability studies // Appl. Environ. Microbiol. —2002. —Vol. 68. —P. 2858–2868.
37. Morrison D. The NASA Astrobiology program // Astrobiology. —2001. —Vol. 1. —P. 3–13.
38. Oldfield C., Pogrebinsky O., Simmonds J., Olson E.S., Kulpa C.F. Elucidation of the metabolic pathway for dibenzothiophene desulphurization by *Rhodococcus* sp. strain IGTS8 (ATCC 53968) // Microbiology. —1997. —Vol. 143. —P. 2961–2973.
39. Pantos O., Cooney R.P., Le Tissier M.D.A., Barer M.R., O'Donnell A.G., Bythell J.C. The bacterial ecology of a plague-like disease affecting the Caribbean coral *Montastrea annularis* // Environ. Microbiol. —2003. —Vol. 5. —P. 370–382.
40. Priscu J.C., Adams E.E., Lyons W.B., Voytek M.A., Mogk D.W., Brown R.L., McKay C.P., Takacs C.D., Welch K.A., Wolf C.F., et al. Geomicrobiology of subglacial ice above Lake Vostok, Antarctica // Science. —1999. —Vol. 286. —P. 2141–2144.
41. Quentin R., Ruimy R., Rosenau A., Musser J.M., Christen R. Genetic identification of cryptic genospecies of *Haemophilus* causing urogenital and neonatal infections by PCR using specific primers targeting genes coding for 16S rRNA // J. Clin. Microbiol. —1996. —Vol. 34. —P. 1380–1385.
42. Rabus R., Fukui M., Wilkes H., Widdel F. Degradative capacities and 16S rRNA-targeted whole-cell hybridization of sulfate-reducing bacteria in an anaerobic enrichment

- culture utilizing alkylbenzenes from crude oil // *Appl. Environ. Microbiol.* —1996. —Vol. 62. —P. 3605–3613.
43. Reed D.W., Fujita Y., Delwiche M.E., Blackwelder D.B., Sheridan P.P., Uchida T., Colwell F.R. Microbial communities from methane hydrate-bearing deep marine sediments in a forearc basin // *Appl. Environ. Microbiol.* —2002. —Vol. 68. —P. 3759–3770.
44. Rees G.N., Patel B.K., Grassia G.S., Sheehy A.J. *Anaerobaculum thermoterrenum* gen. nov., sp. nov., a novel, thermophilic bacterium which ferments citrate // *Int. J. Syst. Bacteriol.* —1997. —Vol. 47. —P. 150–154.
45. Rickard A. H., Leach S.A., Hall L.A., Buswell C.M., High N.J., Handley P.S. Phylogenetic relationships and coaggregation ability of freshwater biofilm bacteria // *Appl. Environ. Microbiol.* —2002. —Vol. 68. —P. 3644–3650.
46. Ringelberg D.B., Talley J.W., Perkins E.J., Tucker S.G., Luthy R.G., Bouwer E.J., Fredrikson H.L. Succession of phenotypic, genotypic, and metabolic community characteristics during in vitro bioslurry treatment of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated sediments // *Appl. Environ. Microbiol.* —2001. —Vol. 67. —P. 1542–1550.
47. Robertson W.J., Bowman J.P., Franzmann P.D., Mee B.J. *Desulfosporosinus meridiei* sp. nov., a spore-forming sulfate-reducing bacterium isolated from gasoline-contaminated groundwater // *Int. J. Syst. Evol. Microb.* —2001. —Vol. 51. —P. 133–140.
48. Rosenberg E. Hydrocarbon-oxidizing bacteria // *The Prokaryotes: An Evolving Electronic Resource for the Microbiological Community*. 3rd edition, release 3.1. —2000. Eds. Dworkin M. et al. Springer-Verlag, New York (<http://link.springer-ny.com/link/service/books/10125/>).
49. Rummel J.D. Planetary exploration in the time of astrobiology: protecting against biological contamination // *Proc. Natl. Acad. Sci.* —2001. —Vol. 98. —P. 2128–2131.
50. Sattler B., Puxbaum H., Psenner R. Bacterial growth in supercooled cloud droplets // *Geophys. Res. Lett.* —2001. —Vol. 28. —P. 239–242.
51. Shen Y., Stehmeier L.G., Voordouw G. Identification of hydrocarbon-degrading bacteria in soil by reverse sample genome probing // *Appl. Environ. Microbiol.* —1998. —Vol. 64. —P. 637–645.
52. So C.M., Young L.Y. Isolation and characterization of a sulfate-reducing bacterium that anaerobically degrades alkanes // *Appl. Environ. Microbiol.* —1999. —Vol. 65. —P. 2969–2976.
53. Vincent W.F. Icy life on a hidden lake // *Science*. —1999. —Vol. 286. —P. 2094–2095.
54. Vincent W.F. Evolutionary origins of Antarctic microbiota: invasion, selection and endemism // *Antarctic Science*. —2000. —Vol. 12. —P. 374–385.
55. Whyte L. G., Bourbonniere L., Greer C.W. Biodegradation of petroleum hydrocarbons by psychrotrophic *Pseudomonas* strains possessing both alkane (alk) and naphthalene (nah) catabolic pathways // *Appl. Environ. Microbiol.* —1997. —Vol. 63. —P. 3719–3723.
56. Yabuuchi E., Yano I., Oyaizu H., Hashimoto Y., Ezaki T., Yamamoto H. Proposals of *Sphingomonas paucimobilis* gen. nov. and comb. nov., *Sphingomonas parapaucimobilis* sp. nov., *Sphingomonas yanoikuyae* sp. nov., *Sphingomonas adhaesiva* sp. nov., *Sphingomonas capsulata* comb. nov., and two genospecies of the genus *Sphingomonas* // *Microbiol. Immunol.* —1990. —Vol. 34. —P. 99–119.
57. Yu Z.T., Stewart G.R., Mohn W.W. Apparent contradiction: psychrotolerant bacteria from hydrocarbon-contaminated arctic tundra soils that degrade diterpenoids synthesized by trees // *Appl. Environ. Microbiol.* —2000. —Vol. 66. —P. 5148–5154.

**О РОЛИ КЛИМАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ
В РАСПРЕДЕЛЕНИИ АНТАРКТИЧЕСКОГО КРИЛЯ
(*EUPHAUSIA SUPERBA DANA*)
И ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОПУЛЯЦИЙ НЕКОТОРЫХ
ЕГО ОСНОВНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Предваряя главную тему, коротко рассмотрим основные положения крупномасштабного и мезомасштабного распределения криля, важного фактора колебаний его обилия.

КРУПНОМАСШТАБНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРИЛЯ

Ареал криля охватывает практически всю акваторию от материка на юге до ЮПФЗ на севере. В пределах этого ареала криль распространен крайне неравномерно, от плотных и крупных скоплений до почти полного отсутствия рачков. По Марру [48] основой ареала криля следует считать области «течения Восточных ветров и моря Уэдделла». В качестве подтверждения этого положения в свете современных знаний можно говорить о приуроченности основы ареала всей суперпопуляции криля к так называемой высокоширотной модификации антарктических вод, к развивающимся вблизи материкового склона океаническим циклонам [3, 7, 8, 12, 14, 24, 60]. Основной перенос криля с течениями осуществляется по периферии этих циклонов. Соответственно, распространение рачков на север происходит с их западными ветвями. Насколько далеко оно произойдет зависит от развития этих ветвей циркуляции. Так, известный крупномасштабный Круговорот Уэдделла (КУ) способствует приближению высокоширотных вод (и с ними криля) почти вплотную к Южной Полярной фронтальной зоне (ЮПФЗ). То же самое можно сказать и о втором участке максимального распространения высокоширотных вод (в данном случае как доли смешанных вод) — районе Круговорота Росса (КР). На других участках Южного океана вблизи ЮПФЗ криль практически отсутствует или его очень мало [11]. Основная масса криля остается в водах высоко-

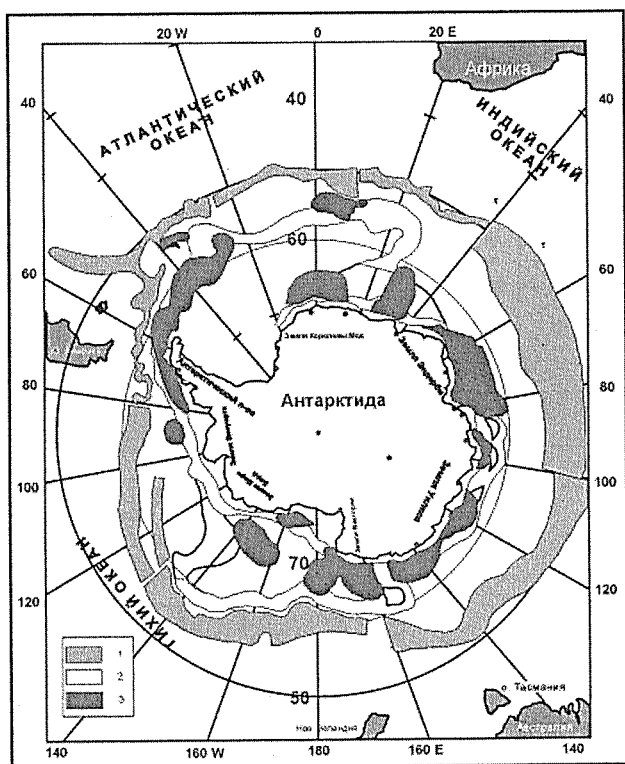


Рис. 1. Пространственная структура антарктических вод и распределение криля. 1 – Южная Полярная фронтальная зона (ЮПФЗ): 10–30° в.д. [23], 30–40° в.д. [46], 40–100° в.д. [53], 80–160° в.д. [31], 165° в.д. – 130° з.д. [1], 130–80° з.д. [34], 80–45° з.д. [23], 40–25° з.д. [5]; 2 – Вторичная фронтальная зона Антарктики (ВФЗА) [18]; 3 – положение наиболее плотных скоплений криля [11].

широтной модификации, составляющих зону его обилия [18]. Можно вполне обоснованно утверждать, что северной границей массового дрейфа криля служит Вторичная фронтальная зона Антарктики (ВФЗА), или Южный фронт Антарктического циркумполярного течения (ЮФАЦТ – SACCFT [54]) (рис. 1). Реальный дрейф криля достаточно сложен, особенно в районах материкового склона и фронтов. Однако часть криля неизбежно выносится на север, а часть возвращается с одним из потоков южного направления к материковому склону. Этот полный цикл не обязательно завершается в пределах одного моря. Цикличность дрейфа – один из важнейших элементов приспособления популяции к динамическим ус-

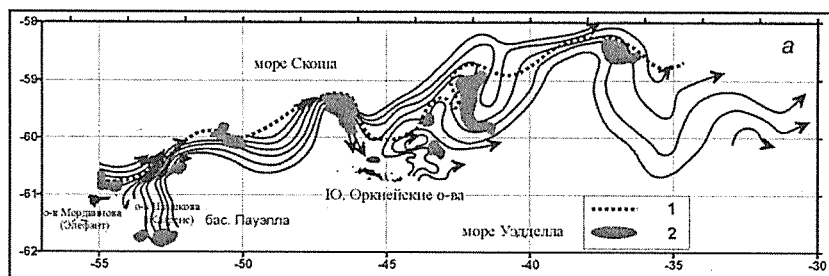


Рис. 2. Геострофические течения (относительно 1000 дб), положение ВФЗА и распределение скоплений криля в южной части моря Скоша летом (январь — март) 1962 г. [9].

ловиям среды [2], заключающегося в частности в обеспечении возможности массового приноса особей в период их созревания в районы, благоприятные для образования скоплений. Как мы увидим ниже сбои в таком снабжении приводят, естественно, к провалам в пополнении популяции.

МЕЗОМАСШТАБНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРИЛЯ

Итак, массовый перенос криля идет по периферии приматериковых циклонических круговоротов. Центральные их части обеднены крилем. Северные и южные периферии характеризуются выраженной фронтальностью на стыке высокоширотных вод (заполняющих циклоны) с шельфовыми водами на юге и с водами Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) на севере. Именно там, большей частью, формируются скопления рачков благодаря воздействию мезомасштабных вихрей [9, 19] (рис.2) и именно эти места массового скопления рачков выполняют функцию основных нерестовых зон [10, 20]. Вдоль Восточной Антарктиды относительно слабое развитие приматериковых циклонов предопределяет незначительный вынос рачков от материкового склона на север. Соответственно этому зоны нереста криля там расположены вблизи материкового склона [10].

Таким образом, зависимость расселения и распределения криля от изменчивости поля течений (в разных пространственных масштабах) очевидна. Как пассивный мигрант, криль дрейфует с течениями и подвержен в силу этого всем соответствующим такому дрейфу отклонениям, задержкам, циркуляциям и пульсациям.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА КОЛЕБАНИЙ В АНТАРКТИКЕ (ВЫДЕЛЕНИЕ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ)

Ранее было установлено пространственное разнообразие меридиональной направленности (знака) тех или иных процессов в атмосфере и океане

[15–17]. Важно отметить сходство в пространственной структуре колебаний в атмосфере и океане, как результат их взаимодействия. Можно выделить и условно оконтурить крупные регионы с однонаправленной реакцией на разного рода крупномасштабные климатические колебания (рис. 3). Можно предположить, что аналогично, т.е. с соответствующим знаком, будут происходить изменения в локальных экосистемах, включенных в каждый из этих регионов (конечно, с учетом локальных особенностей воздействия условий среды на разных представителей животного мира). Вкупе с биологической направленностью колебаний выделенные районы можно характеризовать как природные системы.

Итак, в период развития зонально-симметричного типа атмосферной циркуляции [51] в Антарктике можно выделить, по существу, два зональных пояса, подверженных климатическим колебаниям приземной температуры воздуха с разным знаком (колебания давления на уровне моря, как было показано выше, имеют единую направленность почти во всей Антарктике). Это — пояс вод высокоширотной модификации (Высокоширотная антарктическая природная система — ВАПС на рис. 3), т.е. вод, расположенных к югу от ВФЗА, и пояс низкоантарктических вод АЦТ (Низкоширотная антарктическая природная система — НАПС на рис. 3), располагающихся между ВФЗА и ЮПФЗ. По существу, ВАПС это область высокоширотных вод (включая шельфовые приматериковые воды). В во-

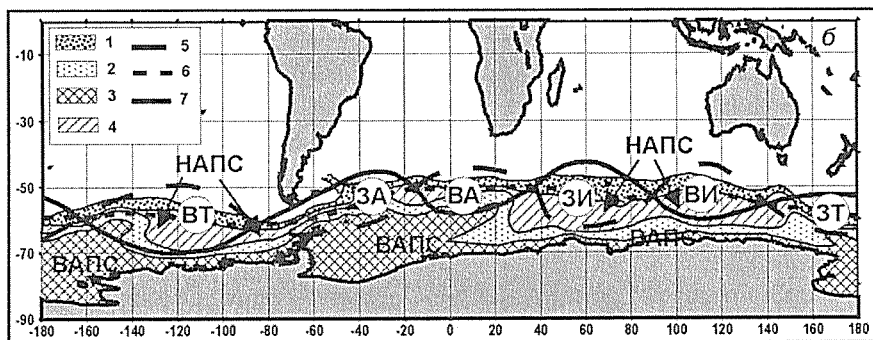


Рис. 3. Схема положения выделенных природных систем и климатических областей в Антарктике.

1 — Южная Полярная фронтальная зона (ЮПФЗ); 2 — Вторичная фронтальная зона Антарктики (ВФЗА); 3 — Высокоантарктическая природная система (ВАПС); 4 — Низкоантарктическая природная система (НАПС); 5, 6, 7 — среднее и экстремальные положения стоячей волны колебаний (см. текст); ЗТ — западно-тихоокеанская, ВТ — восточно-тихоокеанская, ЗА — западно-атлантическая, ВА — восточно-атлантическая, ЗИ — западно-индоокеанская и ВИ — восточно-индоокеанская климатические области.

дах НАПС при зонально-симметричном типе зональные различия направленности колебаний (знака) температуры нивелируются в силу ослабления внедрений контрастных воздушных масс. Зонально-волновой тип, противоположный по характеру зонально-симметричному, характеризующийся ростом амплитуды стоячей волны, напротив, способствует взаимопроникновению теплых и холодных воздушных масс, сопровождающимся усилением меридиональных сдвигов, причем с разным знаком в смежных районах. Как видно на рис.3, севернее циркумполярной ВФЗА выделяются шесть крупных регионов, которые при этих условиях могут характеризоваться последовательной сменой знака направленности процессов в атмосфере и в океане. Схематично положение волны можно представить следующим образом. В каждом из океанов формируются два альтернативных района с противоположным знаком аномалий (в данном случае и температуры воздуха, и давления). Это будут западные (ЗТ) и восточные (ВТ) части в тихоокеанской (примерно 140° в.д. — 180° и 80° з.д. — 170° з.д. соответственно), атлантической (ЗА и ВА, примерно 10° з.д. — 70° з.д. и 0° — 40° в.д.) и индоокеанской (ЗИ и ВИ, примерно 50° в.д. — 90° в.д. и 90° в.д. — 130° в.д.) областях (рис.3). Эти участки соответствуют фиксированным узлам стоячей атмосферной волны распространения аномалий. Они охватывают, прежде всего, районы умеренных широт, но, наряду с ними, часто распространяют свое влияние и на высокоширотные районы. Схема составлена с учетом пространственного распределения кластеров в полях температуры воды и приземного давления, анализа корреляционных матриц распределения коэффициента корреляции между индексами Южного Колебания (ЮК) и Антарктического Колебания (ААК) и показателями Эль-Ниньо с одной стороны и полями температуры воды и приземного давления с другой, а также распределения средних летних значений полей аномалий температуры воды, воздуха и давления в разные климатические эпохи. На рис. 4 приведены несколько примеров таких карт и матриц.

Волновой характер распространения ярко демонстрирует развитие ледового покрова (данные по положению кромки морского дрейфующего льда собраны и систематизированы Т. Джека и были взяты из Интернета с австралийского сайта <http://www.anticrc.utas.edu.au/~jacka>). Колебания индексов ЮК, ААК и показателя Эль-Ниньо 3,4 хорошо коррелируются с зимним распространением льда на некоторых меридианах (рис. 5а). Практически это происходит для всех показателей в одних и тех же местах (естественно, с некоторыми пространственными сдвигами). При этом можно видеть три узла повышенных величин положительного коэффициента корреляции ($r = 0,41 \div 0,57$) и, соответственно, три узла его относительно высоких отрицательных величин ($r = -0.42 \div -0.60$). Между этими узлами

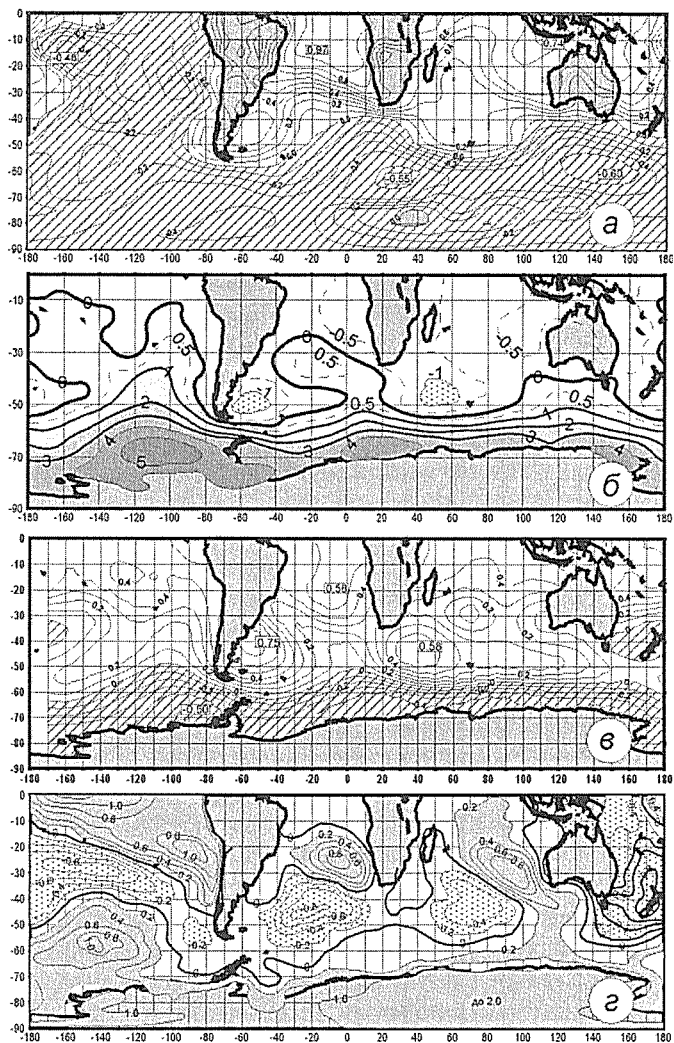


Рис. 4. Примеры пространственной неравномерности колебаний, связанных с распространением стоячей волны [51].

а — распределение коэффициента корреляции (R) между колебаниями аномалий летнего давления в кластере 3 и аномалий давления в каждой точке массива данных; *б* — распределение средних летних аномалий давления на уровне моря в период с 1949 г. по 1977 г.; *в* — распределение R между колебаниями аномалий летней температуры воды в кластере 28 и аномалий геопотенциальных высот поверхности 500 гПа в каждой точке массива данных; *г* — распределение разницы между средней летней аномалией температуры воздуха в годы максимальных индексов ААК и в годы его минимальных индексов.

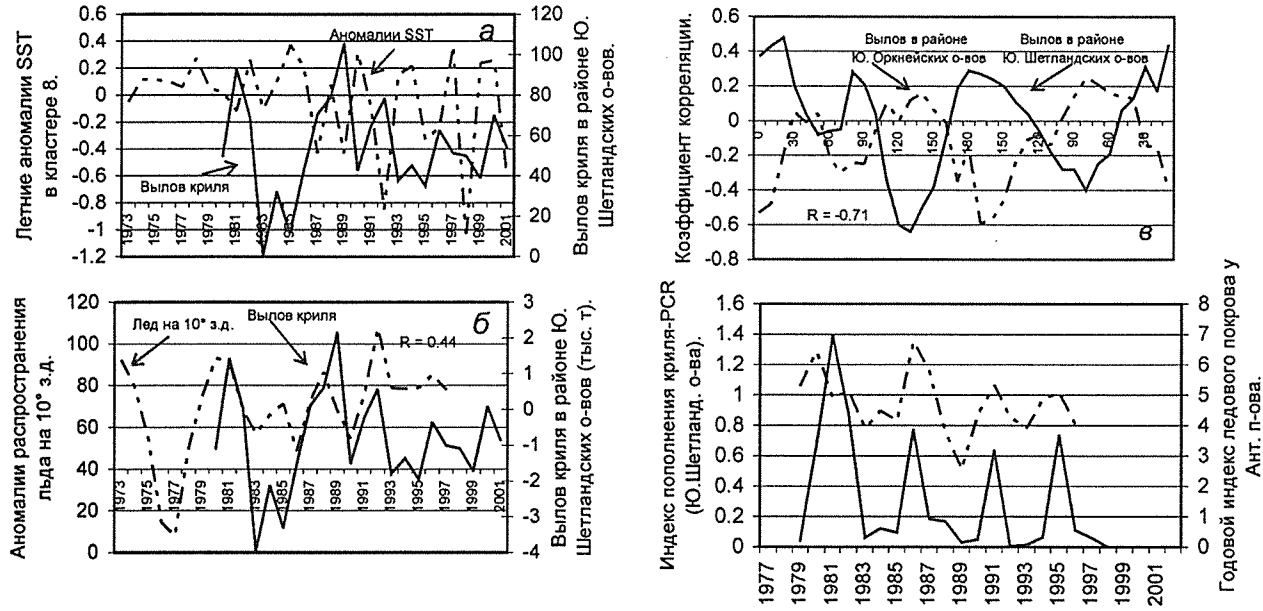


Рис. 5. Колебания коэффициента корреляции между индексами ЮК, ААК и показателем Эль-Ниньо 3,4 и распространением льда на меридианах, кратных 10° (а); изменения распространения льда на 110° з.д. (область ВТ) и 30° з.д. (область ЗА) (б); колебания показателя Эль-Ниньо 3,4 и распространения льда на 80° з.д. (в) и 130° з.д. (г).

повышенной корреляционной связи наблюдаются участки ее пониженных величин. Это свидетельствует о том, что колебания распространения льда имеют характер стоячей волны с волновым числом 3. В то же время нужно иметь в виду, что эта связь распространения льда в Антарктике с индексами глобальных колебаний имеет некоторые пространственные сдвиги, объясняющиеся естественными локальными воздействиями на распространение льда местными особенностями полей ветра и течений.

Колебания волны наиболее явно проявляются лишь в областях ВТ и ЗА. На остальных участках волна действует эпизодически даже в периоды развития зонально-волнового типа циркуляции. Однако знак меридиональной направленности переноса в каждой области, как правило, соответствует колебаниям индекса ЮК и показателей Эль-Ниньо. Таким образом, с большой долей вероятности можно полагать, что в экстремальные годы, т.е. в годы высоких показателей Эль-Ниньо (и, соответственно, низких величин ЮК) в области ВТ произойдет рост температуры воздуха и воды, а в области ЗА более вероятно ее понижение. Соответственно, в областях ВА и ВИ следует ожидать либо нейтральной реакции, либо, также как в области ВТ, роста температуры, но практически исключено сильное похолодание. В областях ЗИ и ЗТ, напротив, следует исключить возможность сильного потепления (как и в ЗА). Соответственно, при развитии противоположного по знаку экстремального события (Ля-Нинья) знак колебаний в перечисленных областях меняется на обратный.

Максимальная амплитуда колебаний волны (зонально-волновой тип атмосферной циркуляции [51]) сопровождается повышенными величинами индекса ААК и пониженными индекса ЮК [17]. Длительная эпоха, характеризующаяся такими показателями, наблюдалась с 1978 г. по настоящее время. Ей свойственно (впрочем, как и в отдельные годы, характеризующиеся подобными величинами индексов) обострение градиента давления между альтернативными поясами, увеличение меридиональных контрастов, усиление воздухо- и водообмена, а с ними и изменчивости температуры воздуха и воды (рост аномалий), интенсификация явления Эль-Ниньо и, соответственно, усиление реакции на него поля температуры в Антарктике [17]. Есть предпосылки к завершению этой эпохи в 2002/2003 гг.

Амплитуда волны может меняться год от года, тем самым либо сглаживая пространственные различия в зональном направлении, либо обостряя их. При низких значениях индекса ААК и, напротив, относительно высоких величинах индекса ЮК (подобные показатели преобладали до 1978 г.) наблюдается обратная описанной выше картина, сопровождаемая ослаблением меридиональных контрастов со всеми вытекающими последствиями [17]. Это так называемый зонально-симметричный тип атмосферной циркуляции

[51]. Схематично он также представлен на рис. 3. Амплитуда волны сводится к минимуму. Соответственно, изменения, происходящие практически во всей зоне НАПС, расположенной между ЮПФЗ и ВФЗА, имеют один знак.

Высокоширотные воды, выделенные на рис.3 как ВАПС, омывают материк. Им свойственны единые колебания температуры воздуха, отличающиеся по знаку от колебаний в поясе НАПС. Эта зона находится вне действия вышеописанной волны, хотя в годы очень интенсивных явлений Эль-Ниньо (и, соответственно, низких величин индекса ЮК) возможно воздействие волны и на высокоширотные приматериковые районы. Такое явление наблюдалось, например, в сезон сильнейшего Эль-Ниньо 1982/83 г., имевшего в некоторых районах очень негативные последствия для криля и его потребителей. Обычно же климатические колебания в ВАПС происходят однонаправленно во всей зоне. Это важный вывод, поскольку основа ареала криля в некоторых районах, в частности, на большей части Восточной Антарктики, прижата к материковому склону и попадает именно в эту высокоширотную зону.

Сложность изучения этих систем заключается в отсутствии жестких границ между ними. Это означает, что возможные отклонения от предложенных контуров (см. рис. 3) естественны и неизбежны, тем более в пограничных районах.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И КРИЛЬ (*EUPHAUSIA SUPERBA* DANA). ИЗМЕНЧИВОСТЬ В РАМКАХ ПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА АНТАРКТИКИ

Можно полагать, что заметные локальные колебания биомассы криля в большей степени связаны с особенностями распределения, чем с изменениями его общего обилия [55, 58]. В свою очередь серьезные изменения в распределении рачков, естественно, связаны, прежде всего, с соответствующими колебаниями переноса масс в атмосфере и океане в меридиональном направлении. Это результат общей океанографической и биологической зональности Антарктики [30, 35]. Изменения меридионального переноса определяют разную возможность выноса криля на северную периферию основы ареала, т.е. в места его массового дрейфа, где формируются крупные скопления и происходит основной нерест. Количество рачков там определяет как условия промысла, так и условия воспроизводства криля.

Выводы об изменениях в морской экосистеме Антарктики, происходивших во второй половине прошлого века, связывались, прежде всего, с изменениями в структуре антарктического планктонного сообщества [41] и, в частности, с фактом значительного роста популяции сальп [42, 47]. В этих изменениях заметны черты воздействия климатических колебаний, связанных с изменениями меридиональной направленности переноса масс в

атмосфере и океане. Рассмотрим несколько примеров. Так, анализ планктонного материала, собранного на разрезе по 67° ю.ш. летом 1992 г. в 6-м рейсе НИС «Академик Иоффе» [6], показал наличие многочисленных вселенцев из северных областей, таких как *C. simillimus*, *Eucalanus longisepts*, *E. hialinus*, *Euphausia frigida*, *E. triacantha* [4]. Это сопровождалось соответствующими климатическими изменениями. Аномалия давления в восточной части тихоокеанского сектора достигала +8 мб, аномалия температуры воздуха превышала +1,5°, аномалия поверхностной температуры воды была выше 1,7° [17]. Глубинный максимум температуры ($T_{\text{макс}}$) достигал величины 2,07°C [13], что свойственно глубинным водам вблизи ЮПФЗ. Все это свидетельствует о необычно сильной адвекции на юг вод АЦТ, расположенных (до их разворота в южном направлении) примерно на 55–56° ю.ш. [57]. Объясняются столь высокие аномалии тем, что 1992 г. — это год Эль-Ниньо. То же самое (и с похожими величинами аномалий) происходило в восточной части тихоокеанского сектора Антарктики и в другие годы, отмеченные событием Эль-Ниньо (1983, 1987, 1995 и 1998 гг.).

Для нас в данном случае особо важен также факт практически полного отсутствия рачков *Euphausia superba* Dana на протяжении большей части разреза, вплоть до западных участков, расположенных вблизи высокоширотных вод у о-вов Баллени [4]. В то же время, судя по данным о распределении скоплений криля [21], в западной части моря Беллинсгаузена обычно происходит вынос рачков от материкового склона в мористую часть с формированием не самых плотных и крупных, но достаточно существенных скоплений в районе 67–70° ю.ш., 80–110° з.д., и, прежде всего, у о-ва Петра I. Так что их отсутствие, по-видимому, есть результат воздействия Эль-Ниньо, выразившегося в усилении переноса масс в атмосфере и в океане (поток вод АЦТ) в направлении с севера на юг (положительные аномалии температуры), препятствующего выносу криля из основы ареала (в данном случае представляющей относительно узкую зону вдоль материкового склона моря Беллинсгаузена) на север.

Повышенная контрастность и высокая изменчивость, характерные для климатических колебаний после 1978 г., стали причиной массового появления сальпы (*Salpa thompsoni*) в традиционных местах массового распределения криля [22, 45]. Это эпизодически наблюдаемое явление становится наиболее частым и регулярным в такие периоды высокой повторяемости взаимовнедрений контрастных масс в атмосфере и океане. Сальпа — типичный представитель вод АЦТ. Таким образом, случаи высокого количества сальпы в районах массовых скоплений криля (большей частью, в пограничных районах между высокоширотными водами и водами АЦТ) можно считать примерами повышенного влияния вод АЦТ.

Район моря Содружества относится к высокоантарктической природной системе (ВАПС). Возможное (при сильном развитии волнового типа циркуляции, как это было в период Эль-Ниньо 1982/83 гг.) воздействие меридиональных переносов в атмосфере и в океане скорее всего характеризовалось, согласно рис. 3, усилением переноса в направлении юг — север. Это привело к выносу криля от материкового склона на север и прекращению его проникновения в залив Прюдс. Промысел в одном из основных районов на несколько лет прекратился в силу отсутствия скоплений.

Характерно, что в районе морей Дейвиса, Моусона и Д'Юрвиля в 1983 г., напротив, был достигнут один из максимальных выловов (более 27 тыс. т криля) [26] за все годы промысла, т.е. наблюдалась обратная картина, характеризующая обилие криля в этом районе. Скопления криля там обычно располагаются вблизи материкового склона. В данном случае, согласно рис.3, вероятно влияние меридионального переноса в направлении север—юг, что, естественно, могло привести к уплотнению скоплений. Наконец, в районе о-вов Баллени, одном из наиболее благоприятных для образования летом крупных и плотных скоплений криля, должны были сформироваться условия, благоприятные для выноса от склона высокоширотных вод (см. рис. 3), богатых крилем. Судя по статистике вылова, летом 1983 г. здесь было поймано также максимальное количество криля — 4718 т [26].

На основании имеющихся данных по распределению скоплений криля можно предположить, что при усилении переноса с севера на юг высокоширотные скопления, располагающиеся, как правило, вблизи материка, вдоль его материкового склона (система ВАПС) станут более плотными. Кроме того, они легче могут проникать в пределы шельфовых зон (конечно, там, где это возможно). Для скоплений криля, располагающихся в области ЗА, т.е. в районах западного шельфа и склона Антарктического п-ова, Ю. Шетландских о-вов, южной части моря Скоша (ВФЗА) и о-ва Ю. Георгия, подобные ситуации (т.е. усиление переноса с севера на юг), напротив, отнюдь не благоприятны. Создаются условия, препятствующие выносу рачков с юга, что приводит к снижению их обилия на участках, где существует наилучшее сочетание факторов для концентрирования криля (сложный рельеф дна на шельфах и в районе Южно-Антильского подводного хребта, наличие ВФЗА — фронтальной зоны, характеризующейся сильным меандрированием).

В случае усиления переноса масс с юга на север картина меняется на противоположную. Высокоширотная приматериковая часть популяции криля, подверженная активному выносу от склона в мористую сторону, может быть, по-видимому, отнесена от участков, наиболее благоприятных

для скапливания, вплоть до включения криля в систему АЦТ. Дальнейший дрейф рачков будет иметь тенденцию к большим потерям популяции. В районах Ю. Шетландских о-вов и о-ва Ю. Георгия составляющая переноса, направленная с юга на север, напротив, благоприятно отразится на выносе рачков в места их традиционного скапливания и нереста, что должно привести к увеличению количества криля там и к росту пополнения.

Как уже было отмечено, хорошим показателем климатических колебаний служит величина распространения дрейфующего льда. Естественно, она также находится в причинно-следственной связи с колебаниями индексов ЮК, ААК и показателей Эль-Ниньо. Причем колебания распространения льда достаточно убедительно соответствуют выделенным природным системам. Конечно, наиболее заметно это в смежных областях ВТ и ЗА. На рис. 5б можно видеть, что распространение льда на 110° з.д. (область ВТ) изменяется, большей частью, в противофазе с 30° з.д. (область ЗА). Весьма показательны сопоставления изменений индексов ЮК, ААК и показателей Эль-Ниньо с аномалиями распространения льда на разных меридианах (рис. 5а). Вот как выглядят кривые летних и зимних аномалий Эль-Ниньо_{3,4} и аномалий распространения льда на 130° з.д. (ВТ) и 80° з.д. (относится к области ЗА) (рис. 5в,г). На 130° з.д. при росте показателя Эль-Ниньо_{3,4} происходит уменьшение распространения льда и наоборот. Это естественно и закономерно. На 80° з.д. картина обратная, т.е. рост показателя Эль-Ниньо приводит к увеличению распространения льда.

Посмотрим, как согласуются выявленные особенности колебаний с биологическими показателями, прежде всего, с обилием криля в районах Ю. Шетландских о-вов, Ю. Оркнейских о-вов и о-ва Ю. Георгия. На рис. 6а, показывающем зависимость обилия криля в районе Ю. Шетландских о-вов от температуры воды в кластере 8 (данный кластер в поле поверхностной температуры воды охватывает районы Ю. Шетландских о-вов, южную и восточную части моря Скоша), видно, что чем выше температура воды, тем ниже вылов криля, и наоборот, наиболее благоприятные условия для обилия рачков создаются при понижении температуры воды, как одного из показателей усиления меридиональной направленности переноса. Столь же высокий уровень связи демонстрирует вылов в районе Ю. Шетландских о-вов с распространением льда на разных меридианах. В атлантическом секторе он имеет положительную связь с распространением льда на участке 10° в.д. — 20° з.д. ($r = 0,37 \div 0,48$) (рис. 6б). Участок высоких величин корреляции ($r = -0,35 \div -0,64$) охватывает 110 – 150° в.д. (рис. 6в). Обилие криля в районе Ю. Оркнейских о-вов также демонстрирует высокую коррелятивную связь с распространением льда, но с обратным знаком по отношению к аналогичной связи вылова криля в районе

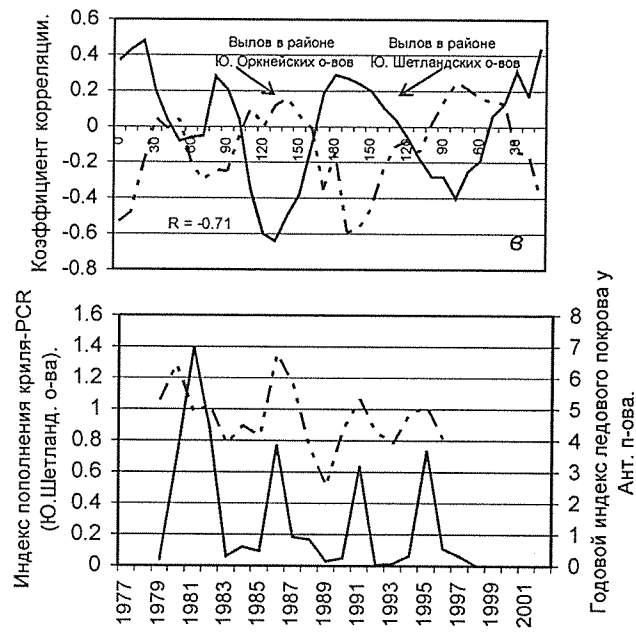
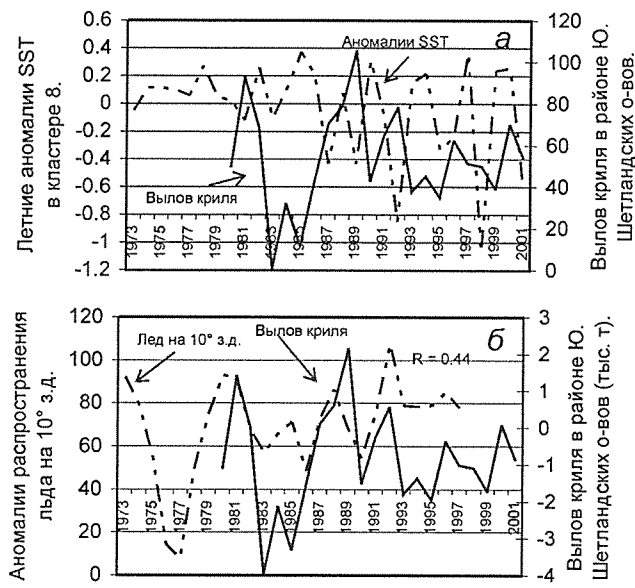


Рис. 6. Обилие криля в районе Ю. Шетландских о-вов и аномалии температуры воды в кластере 8 (а); обилие криля в районе Ю. Шетландских о-вов и распространение льда на 10° з.д. (б); изменение коэффициента корреляции между выловом криля в районах Ю. Шетландских о-вов (подрайон 48.1) и Ю. Оркнейских о-вов (48.2) и аномалиями зимнего распространения льда на меридианах, кратных 10° долготы (в); колебания индекса PCR (см. текст) по [38] и годового индекса ледового покрова у Антарктического п-ова по [37].

Ю. Шетландских о-вов. В результате мы имеем интересный результат, который показывает насколько тесно связаны климатические процессы в атмосфере и океане с биологическими явлениями, в частности, с обилием антарктического криля в двух основных районах его концентрирования — у Ю. Шетландских и Ю. Оркнейских о-вов (рис. 6а).

Успех нереста (плодовитость) в большой мере зависит от количества в скоплениях готового к нересту криля. Выживаемость икры и личинок определяется всеми сопутствующими условиями среды: глубиной и скоростью погружения икры, близостью дна и характером грунтов, наличием и составом бентоса, скоростью и направлением дальнейшего переноса личинок, их выеданием и гибелью на ранних стадиях (науплиус и метанауплиус), наличием корма для более старших личинок (калиптопис, фурцилия), наконец, благоприятными условиями их дрейфа, обеспечивающими сохранение пополнения для данной циклической популяции. Пожалуй, главным фактором, благоприятно воздействующим на выживаемость личинок криля, которые, в отличие от взрослых особей, не могут обходиться без пищи длительное время [56], является наличие ледового покрова в местах нереста после достижения личинками стадий калиптопис и фурцилия [28, 29, 33, 36, 40, 49, 59].

С целью изучения особенностей воспроизводства популяции криля воспользуемся такой характеристикой как PCR (*per capita recruitment*) — индекс так называемого пополнения на особь криля [38] для района Ю. Шетландских о-вов. В формулу для расчета индекса PCR включены данные о доле однолетних особей в выборке в каждый конкретный год и о смертности после вступления в пополнение [38]. Этот индекс, тем самым, позволяет наилучшим образом оценить репродуктивный успех. Колебания индекса PCR исключительно интересны. Они имеют характер четко выраженных пульсаций, связанных с развитием событий Эль-Ниньо. В двадцатилетнем ряду очевидны четыре высокоурожайных года: 1981 (+1982), 1986, 1991 и 1995 гг. (рис. 6б). Годы между ними и после 1995 г. (1996—1998 гг.) характеризовались очень низким пополнением. Продолжительность таких периодов составляла 3—4 года. Мы видим на рис. 6б, что все периоды низких PCR-индексов начинались в годы Эль-Ниньо. Напротив, ни один год из ряда высокоурожайных не падает на эти события.

Большое количество зрелого криля в местах нереста есть условие необходимое, но недостаточное для успешного воспроизводства. Нужны еще условия, способствующие нересту и развитию личинок, из которых можно выделить следующие: 1) расположение скоплений в традиционных местах, т.е. в местах, наиболее благоприятных для их образования; 2) большое количество этих скоплений; 3) наличие круговоротов, преж-

де всего, топогенной природы (см. п.1); 4) устойчивость круговоротов и, соответственно, скоплений (см. п.3); 5) отсутствие теплых внедрений с севера на склон и шельф; 6) отсутствие серьезных пищевых конкурентов, прежде всего, сальп (см. п.5); 7) наличие достаточно развитого ледового покрова, обеспечивающего большую выживаемость личинок подо льдом за счет облегчения доступа к пище и снижения риска выедания хищниками.

Все перечисленные признаки отражают реакцию экосистемы на холодные сезоны, т.е. усиление меридионального переноса в направлении с юга на север. По существу, так и происходит. Это можно видеть на рис. 6г. Годовой индекс ледового покрова у западного побережья Антарктического полуострова [37] демонстрирует четыре максимума: 1980, 1986, 1991 и 1995 гг. Сюда же можно отнести годы 1981 и 1982, когда величина индекса ледового покрова была на уровне 1991 и 1995 гг. Перечисленные годы совпадают с максимальными величинами PCR-индекса пополнения криля в том же районе.

РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ КИТОВ И КРИЛЯ В РАЙОНЕ О-ВА Ю. ГЕОРГИЯ

Еще в эпоху исследований Комитета Дискавери был замечен очень интересный феномен, заключающийся в смене вида китов (финвалов *Balaenoptera physalus* или блювалов *Balaenoptera musculus*), составляющих основу промысла в районе о-ва Ю. Георгия в разные годы [43]. В дальнейшем было установлено, что существовали годы, когда превалировали финвалы, и годы с явным преобладанием блювалов. При этом финвалы предпочитали мелкий криль, блювалы — более крупный. Мелкий криль — это, большей частью, принесенный с юга, из моря Уэдделла. Крупный, соответственно, в основном представлен особями, принесенными с юго-запада, из района Ю. Шетландских о-вов.

На рис. 7а показан график добычи китов того и другого вида в районе о-ва Ю. Георгия в период с 1923/24 г. по 1930/31 г. График построен по данным, приведенным в работе [43]. Очевидно наличие противофазных колебаний в добыче китов этих видов в районе о-ва Ю. Георгия, хотя ряд данных, конечно, весьма короток.

Связь колебаний количественного и видового состава китов, откармливающихся на крилевых ресурсах в районе о-ва Ю. Георгия, с крупномасштабными климатическими колебаниями можно видеть на рис. 7б, в. Средние за теплый сезон (октябрь—март) показатели Эль-Ниньо 3,4 находятся в обратной связи с количеством блювалов и в прямой связи с количеством финвалов. Характерно общее снижение количества китов в 1930 и 1931 гг., в период необычно длительного Эль-Ниньо.

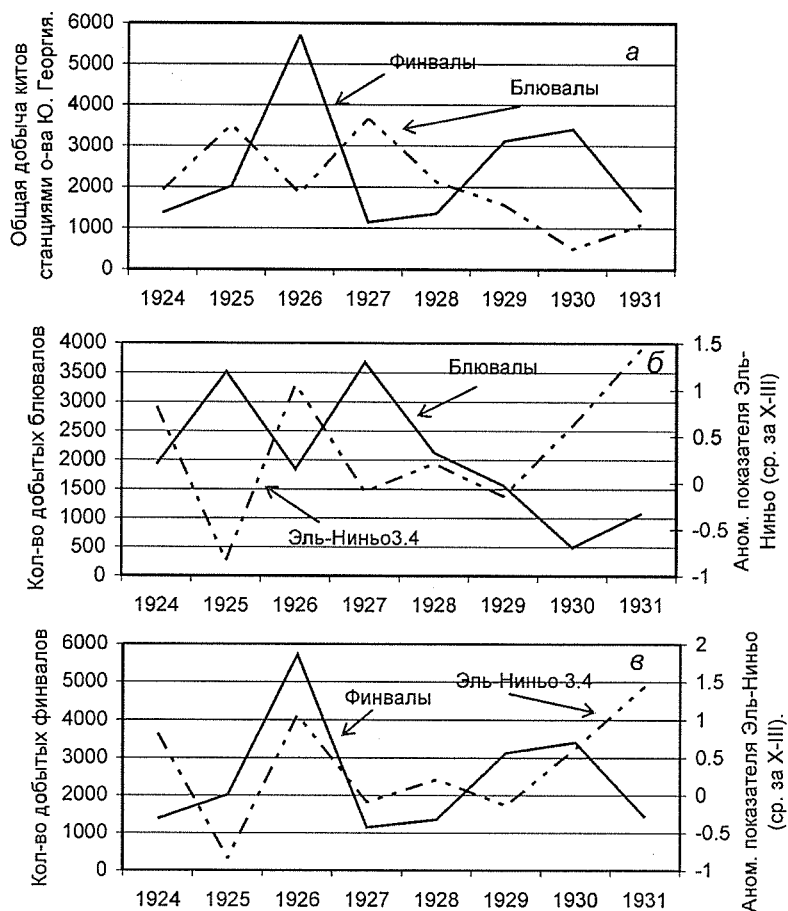


Рис. 7. Добыча блювалов и финвалов в районе о-ва Ю. Георгия в 1924-1931 гг. по [43] (а). Колебания показателя Эль-Ниньо 3,4 (средние за X-III) и добыча блювалов (б) и финвалов (в).

РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В МЕЖГОДОВЫХ И МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЯХ РАЗМЕРА ПОПУЛЯЦИЙ ПИНГВИНОВ (ИМПЕРАТОРСКИХ И АДЕЛИ)

Одним из главных факторов, непосредственно влияющих на воспроизводство пингвинов, является распространение морского льда. И пингвины Адели (*Pygoscelis adeliae*), и Императорский пингвин (*Aptenodytes forsteri*) тесно связаны со льдом в процессе всей жизни и особенно в пери-

од размножения. Несмотря на то, казалось бы явную и объяснимую зависимость пингвинов от распространения льда, некоторые факты оказываются весьма противоречивыми, воздействие льда может быть непостоянным в зависимости от района, вида пингвинов, стадии развития [27]. Лед в данном случае рассматривается как фактор, способствующий или препятствующий добыче пищи (конечно, в случаях, когда она есть вообще в пределах кормовых полей).

Конечно, колонии исторически располагались именно там, где доступ к пище был наиболее гарантирован. Так что некоторые катастрофические для отдельных колоний пингвинов события, произошедшие в последние десятилетия, свидетельствуют о развитии в настоящее время скорее неблагоприятной климатической эпохи. Правда, нужно добавить, что столь отрицательное воздействие условий среды не повсеместно. Более того, оно может менять знак реакции на противоположный в другом (даже смежном) районе. Приведу несколько примеров.

В сезон размножения пингвинов Адели 1995 г. в районе станции Моусон (западная часть моря Содружества) на о-ве Бешервез произошла массовая гибель птенцов Адели [44]. Погибло практически все поколение от истощения в результате недостатка пищи в районе ее добычи родителями. Как оказалось, это связано как с сильным увеличением расстояния между колонией и кромкой льда (до 170 км), так и, по-видимому, с отсутствием пищи в близлежащих водах шельфа, где можно было кормиться в разводьях и полыньях. На рисунке 8а видно, что наиболее благоприятным для местной популяции пингвинов Адели расстоянием от колонии до кромки льда является диапазон 75–85 км. Его увеличение до 100 км (примерно на таком расстоянии располагается здесь материковый склон) и более ведет к резкому снижению репродуктивного успеха.

Колебания размера данной популяции в 1991–1999 гг. можно охарактеризовать, как крайне неравномерные, с резкими перепадами и отсутствием выраженной тенденции. Вообще можно полагать, что долготермическая связь между показателями популяции пингвинов и показателями климатических изменений должна быть более очевидной, чем связь в масштабе межгодовых колебаний. Так, линейные тренды изменчивости числа размножающихся пар пингвинов Адели в районе моря Росса [27] и изменчивости давления в высокоширотном кластере 17 (данный кластер в поле давления на уровне моря охватывает практически всю высокантарктическую область, включая материк) демонстрируют расхождение (рис. 8б). Это указывает на то, что с ростом индекса ААК (ход которого противоположен изменению давления в кластере 17) происходит увеличение числа размножающихся пар пингвинов. То есть переход в конце 1970-х годов к эпохе обострения контрастов,

увеличения изменчивости в Антарктике оказался благоприятным фактором, вызвавшим популяционный рост пингвинов Адели в море Росса. Эпоха повышенных величин индекса ААК — это эпоха развития зонально-волнового типа атмосферной циркуляции, характеризующегося в данной области (ЗТ на рис. 3), большей частью, меридиональной направленностью переноса с севера на юг (при высоких индексах ААК), т.е. ослабления распространения льда на север. Это согласуется с выводами, сделанными для района моря Росса в работе [27] относительно местной популяции пингвинов Адели. Можно заметить, что после 1978 г., т.е. в эпоху, характеризующуюся, в частности, большей повторяемостью отрицательных аномалий летнего индекса ЮК (рис. 8а), рост количества размножающихся пар пингвинов стал особенно выраженным, увеличившись к настоящему времени более, чем в 3 раза по сравнению с 1960-ми годами.

Напротив, в районе западного побережья Антарктического п-ова произошло сильное уменьшение размера популяции пингвинов Адели. Для популяции о-ва Анверс это связано, по-видимому, с известным потеплением и соответствующим сокращением зимнего и весеннего льда, столь необходимого пингвинам Адели для их зимнего существования. В результате в последнее десятилетие заметно снижение количества размножающихся пар на фоне ослабления ледового покрова. Вообще за последние 30 лет здесь произошли очень существенные популяционные изменения трех видов местных пингвинов. Популяция пингвинов Адели сократилась на 53%, а популяции Полицейских и Папуасских пингвинов (видов, ассоциирующихся со свободными ото льда антарктическими и субантарктическими водами) возросли практически в 5 раз, сопровождаясь заметным смещением на юг [32]. В межгодовом плане реакция этой популяции на распространение льда оказывается противоположной ее реакции при нормальных условиях, т.е. увеличение ледового покрова становится благоприятным фактором [27]. Тем самым это противоречит реакции, которую демонстрирует популяция пингвинов Адели в море Росса.

В результате можно заключить, что для популяций пингвинов Адели вообще, вероятно, существует определенное оптимальное количество льда на разных этапах жизненного цикла. Колебания распространения льда как в сторону его сильного увеличения, так и в сторону сильного уменьшения ледового покрова приводят к отрицательному воздействию как на воспроизводство (прежде всего на выживаемость на ранних стадиях развития), так и на выживаемость взрослых особей.

Можно полагать, что оптимальное распространение льда, по-видимому, соответствует его многолетней норме. Таким образом, наиболее благоприятные условия формируются, по-видимому, в период развития зонально-сим-

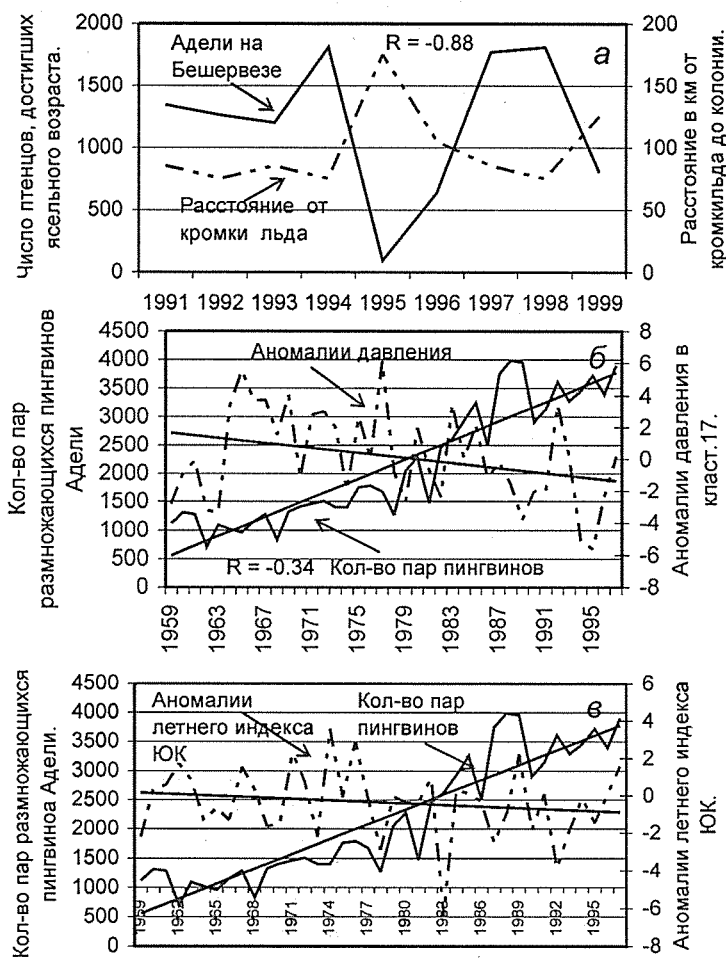


Рис. 8. Число птенцов пингвинов Адели на о-ве Бешервез и изменения расстояния от колонии пингвинов до кромки льда по [39] (а); изменения размера популяции пингвинов Адели моря Росса [27] и колебания аномалий давления на уровне моря в кластере 17 (б) и индекса ЮК (в).

метричного типа атмосферной циркуляции (см. рис.3). Можно высказать предположение о том, что прогнозируемое близкое завершение эпохи контрастов, высокой интенсивности атмосферных процессов (в том числе и явлений Эль-Ниньо) приведет к ослаблению интенсивности потока вод АЦТ в тихоокеанском секторе Антарктики, к ослаблению влияния теплых глубин-

ных вод на склоновые и шельфовые районы западного побережья Антарктического п-ова, к снижению температуры воды там и к восстановлению оптимального зимнего и весеннего ледового покрова, что, в свою очередь должно положительно сказаться на росте местной популяции пингвинов Адели.

Сопоставление колебаний размера популяции пингвинов Адели залива Адмиралти (о-в Кинг-Джордж) с общим выловом криля в районе Ю. Шетландских о-вов показывает неплохую положительную связь (рис. 9а), т.е. рост обилия взрослого криля сопровождается, как правило, увеличением размера популяции пингвинов. Это служит дополнительным косвенным подтверждением вывода, сделанного в работе [61], о росте популяции пингвинов после зим с интенсивным распространением льда и ее уменьшении после зим со слабым распространением. В первом случае, как было показано выше, в популяцию криля вливается успешное пополнение (за счет наличия мощного пищевого ресурса в виде криофильного фитопланктона подо льдом, способствующего повышению выживаемости и взрослых особей криля, и, главное, его личинок) и происходит рост обилия криля, основной пищи пингвинов Адели. Зимы со слабым распространением льда имеют отрицательное воздействие на обе популяции. Сопоставление с ледовыми данными, естественно, демонстрирует высокую коррелятивную связь (до +0.81) между количеством пар размножающихся пингвинов Адели залива Адмиралти и распространением льда предшествующей зимой (рис. 9б,в).

Отмечаемое многими авторами смещение волны аномалий распространения льда с запада на восток [33, 52, 62] в данном случае получает неплохое подтверждение. Выражается оно в высокой положительной связи распространения льда на 80–100° з.д. (т.е. в море Беллинсгаузена) при временном сдвиге на +2 года, а на 50–70° з.д. при сдвиге на +1 год с колебаниями размера популяции пингвинов Адели залива Адмиралти (рис. 9в,г). Это предполагает возможность прогностических разработок, связанных с предсказанием колебаний популяции пингвинов с двухгодичной заблаговременностью по данным о распространении зимнего льда в районе моря Беллинсгаузена или с еще большей оправдываемостью (но меньшей заблаговременностью) по распространению льда прошлой зимой в районе непосредственно у Ю. Шетландских о-вов.

Колебания ледовых условий играют также большую роль в изменениях выживаемости Императорских пингвинов и успехе их размножения, в конечном итоге в колебаниях размера популяции. Как показано в работе [27], в 1975–1981 гг. в районе Земли Адели, где размещается одна из популяций Императорских пингвинов, наблюдалось практически непрерывное сокращение расстояния между кромкой льда (ее зимним положением) и колониями пингвинов (с 420 до 200 км). Это означает, что в этот

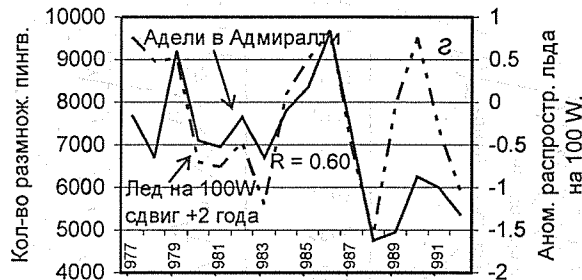


Рис. 9. Сопоставление кол-ва пар размножающихся пингвинов Адели в заливе Адмиралти (о-в Кинг-Джордж) по [61] с выловом криля у Ю. Шетландских о-вов, годовым ледовым индексом для того же района по [37] и аномалиями зимнего распространения льда на разных меридианах (с временными сдвигами).

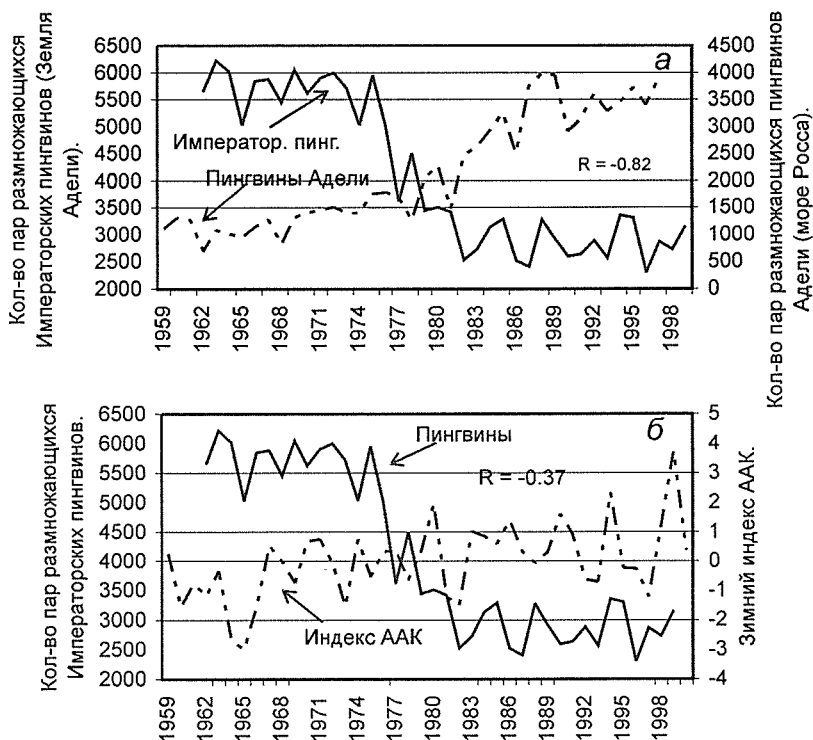


Рис. 10. Сопоставление изменений во времени размеров популяций Императорских пингвинов Земли Адели по [27] и пингвинов Адели моря Росса по [27] (а), размера популяции Императорских пингвинов и зимнего индекса ААК (б).

период здесь превалировал перенос в направлении с севера на юг, который должен был сопровождаться повышением температуры и сокращением ледового покрова. Происходило это в период смены климатических эпох и формирования известного режимного сдвига 1977–1978 гг. (с учетом локальных особенностей в разных пунктах Антарктики 1976–1981 гг.). За этот период размер местной популяции Императорских пингвинов уменьшался столь же интенсивно и к 1982 г. количество размножающихся пар снизилось почти в 3 раза по сравнению с 1962–1975 гг. (рис. 10). Остается неясным, каков механизм столь резкого снижения размера популяции Императорских пингвинов, причем снижения столь существенного, что вплоть до 1999 г. никаких признаков его восстановления не было заметно, хотя распространение льда уже через два года, в 1983 г. достигло

прежних величин. Одним из объяснений может быть отсутствие или малое количество неразрушенного льда, необходимого пингвинам в период линьки [27]. В то же время, следуя канве рассуждений данной работы, можно предположить, что тут вступил в силу характерный для нового климатического режима, наступившего после 1977 г., фактор, а именно, высокая изменчивость межгодовых колебаний (в том числе и распространения льда), не позволяющая стабилизировать ситуацию и способствовать росту популяции, в силу того, что успешные пополнения могут чередоваться с их провалами. В предыдущую эпоху колебания льда, можно полагать, не были столь велики, что должно было благоприятно отразиться на популяционных показателях. Таким образом, предполагаемая смена существующей эпохи, возможно, может вывести популяцию из кризиса и восстановить ее численность. Одним из показателей таких изменений является понижение индекса ААК. Эпоха, когда превалировали его отрицательные аномалии, что наблюдалось до 1978 г. (рис. 10б), характеризовалась стабильно высокими величинами размера популяции Императоров.

Различия в сроках размножения, расположения кормовых полей и доступности пищи для разных видов пингинов, конечно, определяют соответствующие различия в их реакции на изменения условий среды, в конечном итоге различия в долгопериодных колебаниях размеров популяций. Они оказались весьма разительными (рис. 10а) с высокой отрицательной корреляционной связью ($r = -0,82$). Причем наиболее резкие изменения в обоих случаях происходили во второй половине 1970-х годов, согласуясь с известным климатическим режимным сдвигом, наблюдавшимся и впервые обнаруженным в северном полушарии [50], но затем отмеченным и в южном полушарии [25].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке от подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан».

Поступила 24.10.2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов Н.Н., Масленников В.В., Пряников С.М. Положение и структура Полярной фронтальной зоны в западной части тихоокеанского сектора Южного океана // Биолого-океанографические исследования тихоокеанского сектора Антарктики. — М.: ВНИРО-ТИНРО. — 1987. — С. 19–32.
2. Беклемишев К.В. Экология и биогеография пелагиали. — М.: Наука, 1969. — С. 291.
3. Воронина Н.М. К экологии и биогеографии планктона Южного океана // Труды ИОАН, 1975. — Т. 103. — С. 60–87.
4. Воронина Н.М., Масленников В.В. Планктон как индикатор переноса вод в Антарктике // Океанология. — 1993. — Т. 33. — № 5. — С. 717–720.

5. Зозуля С.А., Масленников В.В., Полонский В.Е. Пространственная структура Южной Полярной фронтальной зоны севернее о-ва Южная Георгия// Антарктика. —М.: Наука, 1993. —Вып. 31. —С. 128—140.
6. Кошляков М.Н. Гидрологические исследования в тихоокеанской Антарктике// Океанология. —1993. —Т. 33. —№ 4. —С. 627—631.
7. Латогурский В.И. Выделение независимых популяций антарктического криля// Рыб. хозяйство. —1979. —№ 10. —С.12—14.
8. Макаров Р.Р. Жизненный цикл и особенности распределения *Euphausia superba* Dana // Труды ВНИРО, 1972. —Т.77. —С. 85—92.
9. Макаров Р.Р., В.В. Масленников, Е.В.Солянкин, В.В. Шевцов. Особенности количественного распределения и условия образования скоплений *Euphausia superba* Dana на примере некоторых районов атлантического и тихоокеанского секторов Южного океана// Труды ВНИРО «Биологические ресурсы антарктического криля». —1980. —С.114-145.
10. Макаров Р.Р., Меньшенина Л.Л. Общие черты распределения личинок эуфаузиид в водах Антарктики // Океанология, 1989. —Т 29. —Вып.5. —С. 825—831.
11. Макаров Р.Р., Меньшенина Л.Л., Латогурский В.И. Промысел антарктического криля (*Euphausia superba* Dana) и проблемы рационального использования его ресурсов// Антарктика. М.: Наука, 1993. —Вып.32. —С. 111—124.
12. Масленников В.В. Современные представления о крупномасштабной циркуляции вод Антарктики и пути массового дрейфа криля// Тр. ВНИРО «Биологические ресурсы антарктического криля». —1980. —С. 8—27.
13. Масленников В.В. Предварительный анализ гидрологической структуры вод вдоль разреза// Отчет экспедиции 6-го рейса НИС «Академик Иоффе» в тихоокеанском секторе Антарктики по международной гидрофизической программе WOCE. М.: ИОРАН, 1992. —Т.2. —Ч.1. —С. 15—34.
14. Масленников В.В. Дифференциация вод Антарктики с учетом их воздействия на распределение некоторых видов планктона и рыб// Антарктика. М.: Наука, 1995. —Вып.33. —С. 43—54.
15. Масленников В.В. Пространственная структура колебаний приземного атмосферного давления в Антарктике//Арктика и Антарктика. 2002. 35(1). —С.109—127.
16. Масленников В.В. Пространственная структура климатических колебаний поверхностной температуры воды в Антарктике//Арктика и Антарктика. 2002. 35(1). —С. 128—149.
17. Масленников В.В. Временная структура климатических колебаний в высоких широтах Южного полушария //Тезисы докладов XII Международной Конференции по промысловой океанологии. Светлогорск. Сентябрь 2002. —С. 154—155.
18. Масленников В.В., Попков В.В. Положение зоны взаимодействия антарктических вод разных модификаций как показатель северной границы массового дрейфа антарктического криля//Антарктика. М.: Наука, 1988. —Вып.27. —С. 134—142.
19. Масленников В.В., Солянкин Е.В. Океанологические фронты в Южном океане как основные места массовых скоплений миктофид и криля //Антарктика. М.: Наука, 1993. —Вып.32. —С. 86—93.
20. Меньшенина Л.Л. Ранний онтогенез и экология личинок антарктических эвфаузиид // Диссерт. канд. биол. наук. —М.: —1988. —149 с.

21. *Парфенович С.С.* Некоторые особенности пространственного размещения скоплений антарктического криля // *Океанология*. —1982. —Т.22. —Вып.3. —С. 480—485.
22. *Пахомов Е.А.* Распределение макропланктона в центральной части Индийского сектора Южного океана в летние сезоны 1984—1986 гг.//*Антарктика*. М.: Наука, 1989. —Вып. 28. —С. 145—158.
23. *Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* Водные массы и циркуляция Южного океана. Л.: Гидрометеиздат, 1986. —228 с.
24. *Ярогов Б.А.* О физико-географических условиях ареала// *Труды ВНИРО*. —1969. —Т.66. —С. 85—101.
25. *Ainley D.G., Arrigo K.R., Fraser W.R., Wilson P.R.* Decadal changes in the biota of the Southern Ocean: Evidence supporting a climatic regime shift// *Second GLOBEC Open Science Meeting. Programme and abstracts*. —2002. —P. 91—92.
26. CCAMLR. Statistical Bulletin. 1990. CCAMLR. Hobart. Australia. —Vol. 2 (1980—1989).
27. *Croxall J.P., Trathan P.N., Murphy E.J.* Environmental change and Antarctic seabird populations // *Science*. —2002. —Vol. 297. —P. 1510—1514.
28. *Daly K.L.* Overwintering development, growth and feeding of larval *Euphausia superba* in the Antarctic marginal ice zone// *Limnological Oceanography*. —1990. —Vol.35. —P. 1564—1567.
29. *Daly K.L.* Southern Ocean krill growth and recruitment: an interannual comparison under varying environmental conditions// *Second GLOBEC Open Science Meeting. Programme and abstracts*. —2002. —100 p.
30. *Deacon G.E.R.* Physical and biological zonation in the Southern Ocean// *Deep-Sea Res.* —1982. —Vol. 29. —No.1A. —P. 1—15.
31. *Edwards R.J., Emery W.J.* Australasian Southern Ocean frontal structure during summer 1976—77 // *Austral. J. Mar. And Freshwater Res.* —1982. —Vol.33. —№ 1. —P. 3—22.
32. *Fraser W.R.* The effects of climate warming on the species composition and abundance of pygoscelid penguins near Palmer station, Western Antarctic Peninsula// *Second GLOBEC Open Science Meeting. Programme and abstracts*. —2002. —46 p.
33. *Frazer W.R., Trivelpiece W.Z.* Variability in sea ice coverage and long-term change in the diets of Adelie penguins: implications for Southern Ocean ecosystem studies// *WGEEMM-95/64*. —1995. —26 p.
34. *Gordon A.L.* Structure of Antarctic waters between 20°W and 170°W// *Antarctic Map Folio Series*. Ed. Amer. Geograph. Soc. New York. —1967. —Vol. 6.
35. *Gordon A.L., Taylor H.W., Georgie D.T.* Antarctic oceanographic zonation// In: *Polar oceans* (Ed. by Dunbar M.J.). Proc. Polar oceans conf. Arct. Inst. North Am. Calgary. Alberta. —1977. —P. 45—76.
36. *Hamner W.M., Hamner P.P., Strand S.W., Gilmer R.W.* Behavior of Antarctic krill, *Euphausia superba*: chemoreception, feeding, schooling and molting// *Science*. —1983. —№ 220. —P. 433—435.
37. *Hewitt R.* Areal and seasonal extent of sea-ice cover off the northwestern side of the Antarctic Peninsula: 1979 to 1996 // *CCAMLR Science*. —1997. —Vol.4. —P.65—73.
38. *Hewitt R.* An index of per capita recruitment. // *CCAMLR Science*. —2000. —Vol.7. —P. 179—196.

39. *Irvine L.G., Clarke J.R., Kerry K.R.* Low breeding success of the Adelie penguin at Bechervaise island in the 1998/1999 season// CCAMLR Science. —2000. —Vol. 7. —P. 151–167.
40. *Kawaguchi S., Satake M.* Relationship between recruitment of the Antarctic krill and the degree of ice cover near the South Shetland Islands // Fish. Sci. —1994. № 60. —P. 123–124.
41. *Kawamura A.* Has marine Antarctic ecosystem changed? A tentative comparison of present and past macrozooplankton abundances// Mem. Nat. Inst. Polar Res., Spec. Issue. —1986. —№40. —P. 197–211.
42. *Kawamura A.* Two series of macrozooplankton catches with the N70V net in the Indian sector of the Antarctic Ocean// Proc.NIPR Symp. Polar Biol. —1987. №1. —P. 84–89.
43. *Kemp S., Bennett A.G.* On the distribution and movements of whales on the South Georgia and South Shetland whaling grounds// Discovery Rep. —1932. №6. —P. 165–190.
44. *Kerry K., Clarke J., Gardner H., Murphy R., Hume F., Hodum P.* Adelie penguin chick deaths investigated// Document WG-EMM-95/33. CCAMLR. —1995. —12 p.
45. *Loeb V., Outram D., Nebenzahl D.* AMLR program: Salps and other macrozooplankton near Elephant and King George Islands during January and February 1995// Antarctic journal of the United States. —1995. —Vol30(5). —P. 224–227.
46. *Lutjeharms J.R.E.* Location of frontal systems between Africa and Antarctica: some preliminary results.// Deep-Sea Res. —1985. —Vol. 32. —№12. —P. 1499–1509.
47. *Macaulay M.C., Daly K.L., Mathisen O.A.* Acoustic assessment of the distribution and abundance of micronecton and necton in the Scotia Sea, March 1984.// Antarct.J.U.S. —1984. —Vol.19(5). —P. 141–143.
48. *Marr J.W.S.* The natural history and geography of the Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) // Discovery Rep. —1962. —Vol. 32. —P. 33–464.
49. *Marschall H.P.* The overwintering strategy of Antarctic krill under the pack ice of the Weddell Sea.// Polar Biology. —1988. —Vol.9. —P. 129–135.
50. *Miller A.J., Cayan D.R., Barnett T.P., Graham N.E., Oberhuber J.M.* The 1976 – 77 climate shift of the Pacific Ocean// Oceanography. —1994. —№ 7. —P. 21–26.
51. *Mo K.C., White G.N.* Teleconnections in the Southern Hemisphere // Monthly Weather Rev. —1985. —Vol.113. —P. 22–37.
52. *Murphy E.J., Clarke A., Symon C., Priddle J.* Temporal variation in Antarctic sea-ice: analysis of long term fast-ice record from the South Orkney Island// Deep-Sea Res. —1995. —Vol. 42. —P. 1045–1062.
53. *Nowlin W.D., Klinck J.M.* The physics of the Antarctic Circumpolar Current// Rev. Geophys. —1986. —Vol.24. —№3. —P. 469–492.
54. *Orsi A.H., Whitworth III, T., Nowlin Jr, W.D.* On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current – Deep-Sea Res. —1995. —Part 1. —№42. —P. 641–673.
55. *Priddle J., Croxall J.P., Everson I., Heywood R.B., Murphy E.J., Prince P.A. and Sear C.B.* Large-scale fluctuations in distribution and abundance of krill – a discussion of possible causes.//In: Antarctic Ocean and Resources Variability. D. Sahrhage (ed.). Berlin: Springer Verlag, 1988. —P. 169–182.
56. *Quetin L.B., Ross R.M.* Behavioral and physiological characteristics of the Antarctic krill, *Euphausia superba* // American Zoologist. —1991. —№31. —P. 49–63.

57. *Read J.F., Pollard R.T., Morrison A.I., Symon C.* On the southerly extent of the Antarctic Circumpolar Current in the southeast Pacific // *Deep-Sea Research II*. — 1995. — Vol.42. — No. 4-5. — P. 933–954.
58. *Sahrhage D.* Some indications for environmental and krill resources variability in the Southern Ocean// *Antarctic Ocean and resources variability* (ed. by D. Sahrhage). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. — 1988. — P. 33–40.
59. *Siegel V., Loeb V.* Recruitment of Antarctic krill *Euphausia superba* and possible causes for its variability// *Mar. Ecol. Prog. Ser.* — 1995. — №123. — P. 45–56.
60. *Spiridonov V.A.* A scenario of the Late-Pleistocene-Holocene changes in the distributional range of Antarctic krill (*Euphausia superba*)// *Marine Ecology*. — 1996. — №17 (1–3). — P. 519–541.
61. *Trivelpiece W.Z., Trivelpiece S.G.* Changes in Adelie penguin recruitment: correlations to krill biomass estimates and implications for fisheries management in the Southern Ocean.// *WG-EMM-95/63*. — 1995.
62. *White W.B., Peterson R.G.* An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent // *Nature*. — 1996. — Vol.380. — P. 699–702.

НОВЫЕ ДАННЫЕ О РАННЕЙ МОЛОДИ ЛИПАРОВЫХ РЫБ (*LIPARIDAE*, *SCORPAENIFORMES*) РАЙОНА ОСТРОВОВ КЕРГЕЛЕН И КРОЗЕ

Липаровые рыбы Южного океана и сопредельных вод в последние десятилетия интенсивно изучаются, и к настоящему времени здесь выявлено более сотни видов. Однако подавляющее большинство из них до сих пор известно лишь по единичным находениям, что обусловлено их преимущественно батимальным, придонно-пелагическим образом жизни, поэтому каждая новая поимка рыб этого трудного для изучения семейства имеет значительный интерес. В 1995–2000 гг. районы архипелагов Кергелен и Крозе были исследованы французскими научно-промысловыми экспедициями «IPEKER» и «ICHTYOKER» на исследовательском судне «La Curieuse». Особый интерес проведенных сборов состоял в том, что ловы проводились не только донными тралами, но и пелагическим тралом для облова молоди рыб с ячеей 10 мм. Помимо взрослых особей были пойманы мальки и ранняя молодь липарид нескольких видов длиной 13–48 мм *SL*. Определение молоди липаровых рыб представляет собой еще большие трудности чем таковое взрослых рыб. Таблицы для определения существуют пока только для взрослых экземпляров [4] и составлены они в значительной мере на основе признаков, которые затруднительно выявить у мальков; например, число позвонков, которое определяется по рентгенограммам, число пилорических придатков, число и расположение пор сейсмочувствительной системы, которые на ранних стадиях развития могут быть сформированы не полностью. Нам удалось впервые составить определительную таблицу для идентификации молоди липарид 8 видов длиной 13–48 мм *SL* района архипелагов Кергелен и Крозе. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы дать обзор новых данных о глубоководных представителях рода паралипарис (*Paraliparis*) района архипелагов Кергелен и Крозе и сделать возможным определение их ранней молоди.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Некоторые научные результаты указанных выше экспедиций с описанием района работ и методов сбора материала были опубликованы ранее [3, 8]. Всего было поймано 45 экземпляров липаровых рыб на 31 станции. Подробный перечень материалов с указанием коллекционных номеров, координат поимок и глубин находится в капитальной сводке, освещающей основные результаты этих работ и включающей описание нового вида паралипариса [6]. При обработке рыб были использованы общепринятые для изучения этого семейства методики [4, 5, 9]. В работе приняты следующие сокращения: *A* — число лучей анального плавника, *C* — число лучей хвостового плавника, *D* — число лучей спинного плавника, *P* — число лучей грудного плавника, *SL* — стандартная длина, *lc* — длина головы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В сборах из района архипелагов Кергелен и Крозе идентифицированы особи липаровых рыб следующих видов: *Paraliparis copei kerguelensis*, *P. copei wilsoni*, *P. cf. gracilis*, *P. operculosus*, *P. thalassobathyalis*, *P. neelovi* и *P. cf. neelovi*. Для каждого вида получены новые данные, включающие морфологические особенности или специфику внутривидовой изменчивости, детализирующие их географическое распространение и вертикальное распределение. Выявлен новый вид рода *Paraliparis* (косоротый паралипарис, *P. obliquosus* Chernova, Duhamel) [6]. Обнаружен также малек *Paraliparis*, относящийся, очевидно, к неопisanному пока виду и обозначенный ниже как *Paraliparis sp.*

Косоротый паралипарис известен пока по двум экземплярам. Один из них, длиной около 90 мм, добыт из желудка патагонского клыкача *Dissostichus eleginoides*, пойманного у островов Крозе на глубине 550–1345 м. Второй экземпляр, малек 36 мм *SL*, пойман у островов Кергелен на горизонте 350 м над глубинами свыше 1000 м.

Группа «*Paraliparis copei*». Паралипарисы группы *copei* [4] характеризуются однорядными зубами, маленьким (редуцированным до поры) жаберным отверстием и почти полным отсутствием оперкулярной лопасти. Позвонков 65–74. Грудных радиалий 4(3+1). Лучей C8. Перитонеум и жаберно–ротовая полости черные.

Paraliparis copei kerguelensis Andriashev, 1982. Исследовано 7 экземпляров длиной 81–170 мм *SL* с 5 станций.

Окраска (в спирту) молочно-белая, рыло и подбородок также белые, губы коричневые. Подбородочные поры открываются в общую овальную поровидную ямку. *Interneurale* первого луча *D* внедряется между невральными отростками 3–6 позвонков. Длина головы 15–16,5 % *SL*; диаметр глаза 26–31 % *lc*. Анус на уровне жаберного отверстия или расположен немного кпереди.

Paraliparis c. kerguelensis был ранее известен от архипелага Кергелен и на Кергеленском плато с глубины 580–1050 м [1, 2, 4]. Наши экземпляры пойманы также в районе островов Кергелен на глубине 790–1055 м; молодая особь длиной 83 мм *SL* поймана на глубине 372–613 м.

Paraliparis copei wilsoni Richards 1966. Изучено 9 экземпляров длиной 37–64 мм *SL* с 4 станций.

Окраска (в спирту) кремово-коричневая, рыло и подбородок черновато-коричневые, губы черные. Подбородочные поры открываются раздельно. *Interneurale* первого луча *D* между невральными отростками 5–9 позвонков. Длина головы 17,3 % *SL*, диаметр глаза 23 % *lc*. Анус немного позади вертикали жаберного отверстия.

Paraliparis c. wilsoni был известен с подводной горы Метеор и вдоль Китового подводного хребта до склона юго-западной Африки с глубины 960–1134 м [4]. Наши экземпляры длиной 37–64 мм *SL* пойманы у о-вов Крозе на глубине 700–1040 м. Это новый район ареала вида.

Нами подтверждены различия между *P. c. wilsoni* и *P. c. kerguelensis* по окраске и размеру головы (17–19,6 % vs 15–16,5 % *SL*) [4], а также найдены дополнительные морфологические признаки, позволяющие легко различать даже особей, утративших кожные покровы, или молодь. У *P. c. wilsoni* района о-вов Крозе, в отличие от *P. c. kerguelensis* от о-вов Кергелен, подбородочные поры открываются раздельно (а не в общую ямку), начало спинного плавника несколько сдвинуто назад: *interneurale* первого луча *D* внедряется между остистыми отростками 5–9 (вместо 3–6) позвонков, диаметр глаза немного меньше (21–25,4 % vs 26–31 % *lc*), анус немного позади вертикали жаберного отверстия (vs под или немного впереди нее).

Следует отметить, что в группу *copei* входит ряд географических форм, весьма близких к *P. copei*, но имеющих заметные различия в пигментации, числе позвонков и некоторых пропорциях тела [4]. Представители этой группы известны из Северной Атлантики (номинативная форма), три формы описаны из антарктических и соседних вод (*P. copei kerguelensis*, *P. c. wilsoni*, *P. c. gibbericeps*), несколько неописанных пока форм известны из разных районов Индийского океана [9]. Традиционно они считаются подвидами, однако уровень различий между ними достигает видового ранга. Обращает на себя внимание, что в районе островов Крозе и Кергелен две формы *wilsoni* и *kerguelensis* обитают в непосредственном соседстве, хотя и не симпатрично, и на сходных глубинах. Это также может свидетельствовать в пользу видового ранга этих таксонов.

Paraliparis cf. gracilis Norman, 1930. Изучено 7 экземпляров длиной 48–83 мм *SL* от островов Крозе.

Экземпляры идентифицированы как близкие к *P. gracilis* на основании меристических признаков: позвонков 67–70 (9–10+58–61), *D* 62–64, *A* 57, *C* 8. *P* 15–18 (11–13+1–2+3–4). Невральные отростки трех передних позвонков заметно удлинены и даже немного выдаются над уровнем туловищной мускулатуры. Первый луч *D* внедряется между остистыми отростками 5 и 6 позвонков. Грудных радиалий 4(3+1), все круглые, междиальные отверстия отсутствуют. Пилорические придатки отсутствуют. Поперечная глубокая кожная складка проходит поперек истмуса. Жаберное отверстие достигает уровня 1–2 луча грудного плавника. Анус на уровне передней или средней трети заглазничного расстояния. Жаберная полость и перитонеум черные. Кожа на верхней стороне головы и тела светлая, прозрачная, имеется темная пигментация под покровами вдоль основания *D* и *A*.

Исследованные нами экземпляры от о-вов Крозе отличаются от особей из типового местонахождения (о-в Южная Георгия) следующими признаками: грудной плавник с отчетливой выемкой — длина лучей выемки 50–58 % длины верхней лопасти (*vs* выемка почти отсутствует), отчетливая темно-коричневая полоса имеется вдоль основания спинного и анального плавников под кожей на мускулатуре (*vs* отсутствует). Основная часть желудка светлая, пищевод и прилегающая к нему часть желудка темно-коричневые, кишечник полностью светлый, (*vs* весь желудок и передняя часть кишечника темно-коричневые). Губы, рыло и подбородок, истмус и низ тела между нижними лопастями грудных плавников шоколадно-коричневые (*vs* светлые). Обнаружены также следующие характерные особенности, не отмеченные для южно-георгианских особей. Тонкая, но глубокая (*ca.* 5 % *SL*) складка кожи соединяет основания нижних лопастей грудного плавника впереди ануса. Коракоидальная часть плечевого пояса заметно выдается из нижнего контура тела. Урогенитальная папилла самцов, необычно тонкая и длинная (*ca.* 4 % *SL*), имеет червеобразную форму и коричневую окраску. Указанные различия, возможно, позволят в последующем выделить крозетинскую форму в особый подвид, или даже вид, близкий *P. gracilis*. В настоящее время материалы для решения этого вопроса недостаточны.

Наши экземпляры *P. cf. gracilis* отличаются от симпатричного *P. operculosus* следующими признаками: *C* 8 (*vs* 9–10), *P* 15–18 (*vs* 18–20), оперкулярная лопасть меньших размеров, имеется темная пигментация под покровами вдоль основания *D* и *A* (*vs* отсутствует), грудной плавник глубоко выемчат (*vs* почти не выемчат).

Paraliparis gracilis — один из наиболее обычных видов паралипарисов у островов Южная Георгия, Южные Оркнейские и Южные Сандвичевы; обитает в толще воды и у дна на глубинах от 120 до 1055 м [1, 2, 4, 7, 9].

Обнаружение близкой формы у островов Крозе расширяет ареал группы вплоть до Индоокеанского сектора Южного океана.

Paraliparis neelovi Andriashev, 1982. Изучен малек 35,5 мм *SL* от островов Кергелен, пойманный примерно на глубине 350 м над значительными (более 1100 м) глубинами.

Paraliparis neelovi — единственный известный вид рода в Южном океане с числом хвостовых лучей 6 [4]. Он характеризуется также маленьким жаберным отверстием над основанием грудного плавника и однорядными на задней половине челюстей зубами. Наш малек, имеющий 6 лучей хвостового плавника, сходен с исследованным для сравнения паратипом *Paraliparis neelovi* также общим габитусом, формой оперкулярной лопасти и немного наклонным ртом, деталями окраски (перитонеум черный, жаберно-ротовая полость коричневая, рыло черноватое). Отличается от паратипа светлой окраской головы и тела (орехово-коричневая у последнего), челюстные зубы в несколько рядов (однорядные на задней половине челюстей у паратипа), что, наиболее вероятно, является проявлением возрастной изменчивости.

Paraliparis neelovi ранее был известен по взрослым экземплярам с банок Банзаре и Элан с глубины 1070—2000 м. Высказывалось предположение о его более широком распространении на батимальных глубинах и талассобатии в Антарктике [1,4]. Наше нахождение подтверждает это предположение. Обнаружение малька у островов Кергелен на глубине 350 м над глубиной более тысячи метров свидетельствует о вероятном обитании молоди этого вида в мезопелагиали.

Paraliparis cf. neelovi. В районе островов Кергелен на горизонте 250 м над глубиной 1253 м обнаружен малек длиной 35 мм *SL*, также обладающий 6 лучами хвостового плавника. Единственный известный вид *Paraliparis* Южного океана, обладающий 6 лучами хвостового плавника — *P. neelovi*. Наш экземпляр сходен с *P. neelovi* и по другим меристическим признакам: позвонков 56, *D* 48, *A* 44, *interneurale* первого луча *D* внедряется между остистыми отростками 5 и 6 позвонков, лучей *P* 16(10+2+4). Однако этот экземпляр несколько отличается от описанного выше малька *P. neelovi* общей формой головы и тела, строго горизонтальным ртом (vs немного наклонный), верхний луч *P* у него на уровне верхнего края глаза (vs на уровне его нижнего края), оперкулярная лопасть прямоугольная, со сторонами равной длины (vs треугольная, верхняя ее сторона в два раза длиннее нижней). Поскольку необходимы дополнительные экземпляры для суждения о таксономическом значении этих различий, этот экземпляр обозначен как *Paraliparis cf. neelovi*.

Paraliparis operculosus Andriashev, 1979. Изучено 4 экземпляра с 4 станций от островов Кергелен, включая экземпляр длиной 13,2 мм *SL* (малек).

Экземпляры определены как *P. operculosus* на основании следующих признаков. Позвонков 61—62. *D* 55—56. *A* 50. *C* 9 (1+8). *Hypurale* одна, без щели. Оперкулярная лопасть большая, длина *operculare* 38—39 % *lc*. Грудной плавник почти не выемчат, его длина 87—94 % *lc*. Лучей *P* 20 (12—13+3+4); нижние 5—6 из них свободны от плавниковой перепонки почти полностью. Грудных радиалий 4, равнорасставленные. Голова 23—24 % *SL*, антеанальное расстояние 28—34 %. Перитонеум черный, цвет стенки желудка от темнокоричневого до черного. У взрослых жаберное отверстие достигает уровня 2—4 луча *P*. Зубы в основном простые, задние в рядах с небольшими плечиками. Подбородочные поры сближены. Малек 13,2 мм *SL* сходен с взрослыми особями основными признаками (включая большую, выдающуюся над основанием грудного плавника оперкулярную лопасть) и окраской; все сенсорные поры у него уже сформированы (2—6—7—1). По сравнению с взрослыми особями у него анус расположен ближе к началу анального плавника, жаберное отверстие расположено полностью выше основания *P*, подбородочные поры расположены в общей ямке.

Paraliparis operculosus — обычный вид у островов Кергелен. Он отмечен также у о-ва Херд и на банке Скиф. Чаще встречается на глубинах от 600 до 700 м, диапазон известных глубин обитания составляет 380—1010 м [4, 7]. Наши экземпляры отмечены на большей глубине (1129—1295 м) чем все прежние находения. Впервые описан малек этого вида длиной 13,2 мм *SL*, пойманный на глубине 700—750 м.

Paraliparis thalassobathyalis Andriashev, 1982. Изучено 12 экземпляров с 6 станций из района островов Крозе и Кергелен длиной 75—112 мм *SL* и малек 28 мм *SL*.

P. thalassobathyalis отличается от всех южноокеанских видов небольшим числом позвонков (56—59), лучей в *C* (5) и *P* (15—17), черным желудком и другими характерными особенностями. Все признаки наших экземпляров хорошо соответствуют диагнозу. Однако наш материал *P. thalassobathyalis* оказался полиморфным. Обнаружены особи трех морфологических типов, различающихся габитуально (наличие или отсутствие «горба») и особенностями окраски (пигментация хвостовой части тела). Однако наши материалы не позволяют однозначно заключить, является ли это проявлением полового диморфизма, либо свидетельствует о наличии двух внутривидовых форм. Необходимы дополнительные материалы для решения этого вопроса.

Paraliparis thalassobathyalis описан из южной части Кергеленского подводного хребта и сопредельных океанских банок (Банзаре, Элан), известен у о-вов Крозе [4, 7]. Локальные формы *P. thalassobathyalis* описаны от скал Шаг и с подводной горы Метеор [4]. Наши экземпляры от о-вов Кергелен

ближе к типичной форме. Все предыдущие находжения вида были сделаны в батипелагиали на глубинах 620–1600 м. Исследованные нами экземпляры, не только молодь, но и взрослые, добыты пелагическим тралом на глубинах 45–350 м над глубинами 1018–1291 м. Это свидетельствует о том, что *P. thalassobathyalis* ведет не только батипелагический образ жизни, но обитает в толще воды и на меньших глубинах. Другое объяснение многочисленным находжениям вида в уловах донного трала может состоять в том, что эти тралы не имели замыкателя, и паралипарисы могли попадать в них из толщи воды при подъеме трала.

Paraliparis sp. — светлоголовый *Paraliparis*. Малек длиной *SL* 44 мм, относящийся, по-видимому, к неопisanному пока виду, найден у островов Кергелен на глубине 400 м над глубинами более 1000 м. Отличается от всех известных видов паралипарисов Южного океана уникальной комбинацией признаков (позвонков 58, *D* 52, *A* 41, *C* 7, жаберно-ротовая полость светлая). Семь хвостовых лучей имеется только у *P. cerasinus*, *P. devriesi*, *P. mawsoni*, *P. monoporus*, *P. stehmanni*, *P. tetrapteryx* [4], но все эти виды — многопозвонковые (68–81 позвонков vs 58 у нашего экземпляра). Наш экземпляр относится к малопозвонковым паралипарисам [4], и среди них к группе видов с небольшим числом лучей грудного плавника (*P* 14–19). Эта группа включает *P. australis*, *P. eltanini*, *P. asperses*, *P. charcoti*, *P. thalassobathyalis* и *P. operculosus*. Причем у всех этих видов число лучей *C*, в отличие от нашего экземпляра, 4–5 или 8–9. Наш экземпляр наиболее сходен с *P. duhameli*, известным с батиали о-вов Крозе, но отличается от него числом лучей *C* 7(6+1) vs 8(4/4), задние в рядах зубы с боковыми лопастями (vs простые), в верхней лопасти *R* лучей 11 (vs 19), все внутренние органы светлые (vs пилорические придатки черные). Вид пока не описывается как новый, поскольку имеется лишь один малек не лучшей сохранности.

Таблица для определения ранней молодежи видов рода *Paraliparis* длиной 13–48 мм *SL* района островов Кергелен и Крозе

- | | | |
|-------|---|-----------------------------|
| 1(2). | Рот отчетливо косой. Лучей грудного плавника <i>P</i> 19(11+3+4), лучей хвостового плавника <i>C</i> 5. Жаберное отверстие доходит до уровня 2–3 луча грудного плавника | <i>P. obliquosus sp.n.</i> |
| 2(1). | Рот горизонтальный (у молодежи <i>P. neelovi</i> немного наклонный). <i>P</i> , <i>C</i> и жаберное отверстие не как описано выше | 3 |
| 3(4). | Лучей хвостового плавника <i>C</i> 5. Лучи нижней лопасти грудного плавника и его выемки заметно выдаются из плавниковой мембраны. Лучей грудного плавника <i>P</i> 15–19(9–10+2–4+3–5) | <i>P. thalassobathyalis</i> |
| 4(3). | Лучей хвостового плавника <i>C</i> 6–9 | 5 |

- 5(6). Лучей хвостового плавника *C* 6 7
- 6(5). Лучей хвостового плавника *C* 7–9 9
- 7(8). Рот немного наклонный. Верхний луч грудного плавника на уровне нижнего края глаза. Оперкулярная лопасть треугольная, ее дорсальная сторона в два раза длиннее вентральной стороны *P. neelovi*
- 8(7). Рот строго горизонтальный. Верхний луч грудного плавника на уровне верхнего края глаза. Оперкулярная лопасть прямоугольная, со сторонами равной длины *P. cf. neelovi*
- 9(10). Лучей хвостового плавника *C* 7 (6+1). (Позвонков 58. Лучей верхней лопасти *P* 11) *Paraliparis sp.* (светлоголовый паралипарис)
- 10(9). Лучей хвостового плавника *C* 8–10 11
- 11(12). Зубы на челюстях расположены в несколько косых рядов. Оперкулярная лопасть хорошо развита, большая. Лучей грудного плавника *P* 15–20 ... 15
- 12(11). Зубы на челюстях однорядные. Оперкулярная лопасть практически не выражена. Лучей грудного плавника *P* 20–22 (Группа *P. copei*) 13
- 13(14). Подбородочные поры открываются в общую ямку. Кожа (в спирту) молочно-белая, губы черные, подбородок и рыло светлые. Длина головы 15–16,5 % *SL*. Глаз большой – 26–31 % *lc*. Анальное отверстие под или немного впереди вертикали жаберного отверстия *P. copei kerguelensis*
- 14(13). Подбородочные поры открываются раздельно (не в общую ямку). Кожа (в спирту) светлая, кремово-коричневая, губы, подбородок и рыло черновато-коричневые. Голова 17–19,6 % *SL*. Глаз 21–25,4 % *lc*. Анальное отверстие немного позади вертикали жаберного отверстия *P. copei wilsoni*
- 15(16). Лучей *P* 15–18. Лучей *C* 8. Оперкулярная лопасть имеется, но не увеличена. На теле под покровами вдоль основания спинного и анального плавников отчетливо выражены темно-коричневые полосы *P. cf. gracilis*
- 16(15). Лучей *P* 18–20. Лучей *C* 9–10. Оперкулярная лопасть очень большая, заметно выдается назад за основание грудного плавника. Хвостовая часть тела совершенно светлая *P. operculatus*

ОБСУЖДЕНИЕ

Район архипелагов Кергелен и Крозе достаточно часто посещается исследовательскими судами. Нахождение новых видов паралипарисов (косоротый паралипарис, светлоголовый паралипарис) в этом сравнительно хорошо исследованном районе Южного океана свидетельствует о том, что даже эта акватория еще недостаточно хорошо изучена в фаунистическом отношении, особенно на батимальных и больших глубинах. Данные, полученные при исследовании уже известных здесь видов липаровых рыб так-

же интересны. В этом районе встречаются две формы *Paraliparis* группы *copei*: *P. copei kerguelensis* у о-вов Кергелен и *P. copei wilsoni* у о-вов Крозе. Очевидно, что различия между этими формами достигают видового уровня. Однако в настоящей публикации оставлен подвидовой ранг этих таксонов, так как необходимо провести полную ревизию всей этой группы видов с привлечением дополнительных материалов из Северной Атлантики, Антарктики и Индийского океана.

В районе о-вов Крозе обнаружены экземпляры, которые почти по всем диагностическим признакам соответствуют *P. gracilis*, описанному от Южной Георгии, и без сомнения не могут быть отнесены ни к одному другому известному виду. С другой стороны, обнаружены некоторые их существенные отличия от особей из типового местообитания, достигающие, возможно, подвидового или даже видового уровня. Однако для окончательного суждения об их таксономической значимости необходимы дополнительные материалы.

Paraliparis neelovi был ранее известен только по взрослым особям с банок Банзаре и Элан с глубины 1070–2000 м. Нахождение малька длиной 35,5 мм *SL* в районе о-вов Кергелен на горизонте 350 м над глубиной 1111 м показывает, что молодь этого вида, скорее всего, мезопелагическая и может распространяться с течениями. Этим подтверждается высказывавшаяся ранее гипотеза о возможности широкого распространения *P. neelovi* в батимальной и талассобатимальной зонах Южного океана [2, 7]. Оказалось, что наличие пелагической молоди, позволяющей широкое расселение с помощью течений довольно обычно и для других глубоководных липарид. В мезопелагиали над большими глубинами обнаружена молодь (длиной 13,2–48 мм *SL*) следующих видов южноокеанских паралипарисов: *P. obliquosus*, *Paraliparis cf. neelovi*, *P. operculosus*, *P. thalassobathyalis* и светлоголовый паралипарис — *Paraliparis sp.*

Российский автор поддержан грантом РФФИ № 00-15-07794 и проектом «Проведение комплексного изучения антарктической биоты» подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики».

Поступила 24.10.2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрияшев А.П. Обзор рыб рода *Paraliparis* (*Liparidae*) Кергеленского региона (Субантарктика) // Зоол. журнал. — 1982. — Т. 61, вып. 5. — С. 716–725.
2. Андрияшев А.П. Обзор липаровых рыб (*Scorpaeniformes*, *Liparidae*) Субантарктических островов Индийского океана с описанием нового вида рода *Paraliparis* // Вопр. ихтиологии. — 1994. — Т. 34, вып. 3. — С. 293–297.

3. Чернова Н.В., Дюамель Г. Новые данные о составе и распределении липаровых рыб (*Liparidae*, *Scorpaeniformes*) района о-вов Кергелен и Крозе // Экспресс-информация, вып. 15. Тез. докл. научной конференции «Исследования и охрана окружающей среды Антарктики» (Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2002 г.). ГНЦ РФ ААНИИ, Санкт-Петербург, 2002. —С. 110–111.
4. Andriashev A.P. Review of the snailfish genus *Paraliparis* (*Scorpaeniformes: Liparididae*) of the Southern Ocean. // Koenigstein: Koeltz Scientific Books (Theses Zoologicae 7). —1986. — 204 p.
5. Chernova N. A review of the genus *Psednos* (*Pisces, Liparidae*) with description of ten new species from the north Atlantic and southwestern Indian ocean // Bull Mus. Comp. Zool., 2001. —Vol. 155, № 10. —P. 477–507.
6. Chernova N.V., Duhamel G. A new species and additional records of *Paraliparis* (*Scorpaeniformes: Liparidae*) from the Southern Ocean with a provisional field key to juveniles // Cybium, 2003. —Vol. 27, № 2. —P. 137–151.
7. Duhamel G. Descriptions d'espèces nouvelles de *Careproctus* et *Paraliparis* et données nouvelles sur ces genres et le genre *Edentoliparis* de l'océan Austral (*Cyclopteridae, Liparinae*) // Cybium, 1992. —Vol. 16, № 3. —P. 183–207.
8. Duhamel G. The pelagic fish community of the Polar Frontal Zone off the Kerguelen islands // Fishes of Antarctica: A biological overview. DiPrisco G., Pisano E & A. Clarke, (eds). Milano: Springer Verlag, 1998. —P. 63–74.
9. Stein D.L., Chernova N.V., Andriashev F.P. Snailfishes (*Pisces: Liparidae*) of Australia, including descriptions of thirty new species // Rec. Aust. Mus., 2001. —Vol. 53, № 3. —P. 341–406.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И СИСТЕМАТИКА РЫБ ПОДОТРЯДА НОТОТЕНИЕВИДНЫХ (*NOTOTHENIOIDEI*, *PERCIFORMES*) В СВЕТЕ ДАННЫХ ОНТОГЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В связи с длительной эволюцией в экстремальных условиях Антарктики подотряд *Notothenioidei* является объектом пристального внимания ихтиологов на протяжении почти двух столетий. В настоящее время более или менее полно изучены видовой состав, морфология, кариология, молекулярная биология и физиология многих видов, предложены гипотезы родственных отношений и разработана система подотряда. Вместе с тем, до сих пор остаются нерешенными проблемы происхождения, диагностических признаков и монофилии этой таксономической группы, а также систематического положения одного из наиболее примитивных семейств *Bovichtidae*. История поисков сестринской для нототениевидных группы, а также их возможного предка более или менее полно изложена в работе Хастингса [44]. Вкратце можно выделить основные результаты этих исследований. В настоящее время большинство современных ихтиологов принимает *Notothenioidei* как самостоятельный подотряд *Perciformes* [2, 34, 42, 58, 59 и др.]. Вместе с тем, осуществлялись попытки различных форм объединения нототениевидных с *Blennioidei*, *Zoarcoidei* и *Trachinoidei* [29, 40, 41, 49], объединения всех вместе в таксон более высокого ранга или же непосредственного включения их в подотряд *Trachinoidei* [28]. Ряд современных авторов или выводит нототениевидных из *Trachinoidei* [44] или считает их происходящими от общих предков с наиболее примитивным семейством *Trachinoidei* — *Pinguipedidae* [5]. Высказано предположение о возможности существования общих предков нототениевидных с *Zoarcoidei* [25].

В настоящее время не вызывает сомнений значение онтогенетического анализа для реконструкции эволюции и происхождения различных групп животных. Для костистых рыб, систематика которых во многом основывается на остеологических признаках, существенное значение при-

обретает изучение развития скелета. Это оправдано относительной стабильностью закладки [55] и морфогенетических преобразований костных элементов в пределах таксономической группы. Особую ценность подобные исследования приобретают для рыб подотряда *Notothenioidei*, палеонтологические находки которых до сих пор крайне редки и не имеют существенного значения для филогенетического анализа. В последнее время изучено развитие костного скелета в онтогенезе 30 видов нототениевидных рыб [9, 10, 12–14, 18, 72–76]. Целью настоящей работы был сравнительный анализ развития скелета в онтогенезе нототениевидных и других подотрядов окунеобразных рыб группы *Blennioidei s.l.* и сопоставление его с данными по остеологии взрослых рыб для выявления особенностей развития *Notothenioidei*, послуживших основой для их обособления и проливающих свет на происхождение этого подотряда. Для сравнения использованы данные по развитию скелета рыб подотрядов *Percoidei* [15, 35–38, 48, 50, 54, 77], представляющего собой предковую группу *Blennioidei s.l.* [21, 25, 41, 52, 25], *Zoarcoidei* [16, 23] и *Blennioidei* [62, 78]. К сожалению, в литературе отсутствуют данные по развитию скелета в онтогенезе *Trachinoidei*, а сведения по строению скелета взрослых рыб самого примитивного в подотряде и наиболее важного для нас семейства *Pinguipedidae* весьма неполны [30, 56, 66]. Поэтому, насколько это оказалось возможным, для сравнения были использованы признаки строения скелета взрослых *Cheimarrichthyidae* [56], а также *Pinguipedidae*, изученные дополнительно.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для исследования был использован материал по развитию скелета в онтогенезе 32 видов, представляющих семь из восьми семейств нототениевидных: *Bovichtyidae*: *Bovichtus angustifrons* Regan, *B. chilensis* Regan; *Pseudaphritidae*: *Pseudaphritis urvilli* Valenciennes; *Nototheniidae*: *Notothenia neglecta* Nybelin, *Lindbergichthys nudifrons* (Lönnberg), *L. mizops* (Günther), *Gobionotothen gibberifrons* (Lönnberg), *Nototheniops larseni* (Lönnberg), *Lepidonotothen kempi* (Norman), *Pseudotrematomus scotti* (Boulenger), *P. pennelli* (Regan), *P. loennbergi* (Regan), *Trematomus newnesi* (Boulenger), *Pagothenia borchgrevinki* (Boulenger), *Dissostichus mawsoni* Norman; *Aethotaxis mitopteryx* DeWitt, *Pleuragamma antarcticum* Boulenger; *Harpagiferidae*: *Harpagifer antarcticus* Nybelin; *Artedidraconidae*: *Artedidraco scottsbergi* Lönnberg, *Pogonophryne* sp.; *Bathydraconidae*: *Psilodraco breviceps* Norman; *Prionodraco evansii* Regan, *Parachenichthys charcoti* (Vaillant), *P. georgianus* Fischer; *Channichthyidae*: *Champscephalus gunnari* (Lönnberg), *Channichthys rhinoceros* Richardson, *Pseudochaenichthys georgianus* Norman, *Pagetopsis macropterus* (Boulenger), *Chionodraco rastrispinosus* DeWitt et Hureau, *Chaenodraco wilsoni* Regan, *Chaenocephalus aceratus* (Lönnberg) и *Cryodraco antarcticus* Dollo.

Дополнительно исследовано строение скелета *Parapercis allporti* Günther SL 143,6 мм и строение висцерального скелета *P.chilensis* Norman SL 271,2 мм из семейства *Pinguipedidae* подотряда *Trachinoidei* и *Bathymaster signatus* Cope SL 241 мм из семейства *Bathymasteridae* подотряда *Zoarcoidei*.

Препараты окрашены ализарином по методике Поттхоффа [65].

В кладиристическом анализе основное внимание было уделено признакам примитивных представителей рассматриваемых подотрядов, чтобы при анализе особенностей, присущих им во время становления, не принимать во внимание более поздние черты продвинутых семейств, которые часто возникают параллельно в различных подотрядах и даже отрядах *Acanthopterygii*. В анализ включен недавно описанный Назаркиным [22] *Trispinax ladae* из ископаемого семейства *Trispinacidae*, рассматриваемого им как одно из примитивных семейств подотряда *Trachinoidei*.

РЕЗУЛЬТАТЫ

У нототениевидных рыб отмечена поздняя закладка *supraoccipitale*, в результате которой происходит ее частичная редукция [12], и у взрослых рыб гребневидный отросток *supraoccipitale* никогда не выступает в верхнем профиле черепа [3, 6, 8, 11, 24, 33, 45]. Сходное развитие и строение *supraoccipitale* взрослых рыб отмечено в *Stichaeoidae*, ныне *Zoarcoidei*, [20, 21], и других *Zoarcoidei* [16, 23, 41], *Blennioidei* [62, 70, 78] и в семействе *Trispinacidae* [22]. У *Percioidei* гребневидный отросток *supraoccipitale* развивается в значительно большей степени [15, 37–38, 48, 50, 54, 77] и у взрослых рыб выступает в верхнем профиле черепа, достигая спереди заднего края глазницы [41]. У рода *Prolatilus*, наиболее генерализованного представителя семейства *Pinguipedidae*, было найдено типичное перкоидное состояние этого признака [41]. У *Parapercis allporti* гребень *supraoccipitale* выступает в верхнем профиле черепа, то есть сохраняет предковое строение. Это заставляет предположить, что сходное строение *supraoccipitale*, возможно, имеется и у других видов *Parapercis* и существовало у предка семейства *Pinguipedidae*.

У *Parapercis allporti* отмечена редкая черта строения неврокраниума. У этого вида нижняя связка *posttemporale* прикрепляется к переднему нижнему краю *intercalare* на ее границе с *prooticum*, перекрывая заднюю часть ушного отдела черепа, а не к заднему краю *intercalare*, как у других рассматриваемых здесь окунеобразных рыб.

В окологлазничном кольце большинства нототениевидных закладывается четыре костных элемента. У отдельных продвинутых представителей подотряда их число увеличивается до пяти (*Notothenia*, *Paranotothenia*) [3], шести – семи (*Channichthyidae*) [73, 47] или уменьшается до двух в связи с отсутствием закладки первого и второго *postlacrimalia* (*Pagothenia*,

Pleuragramma, *Psilodraco*) [74, 76]. Закладка элементов окологлазничного кольца *Zoarcoidei* происходит, как у нототениевидных [16], а в целом число окологлазничных элементов последовательно возрастает до 7–10 у наиболее продвинутых родов *Zoarcidae* [41, 26]. Онтогенез *Blennioidei* характеризуется поздним появлением закладки *lacrimale* и двух *postlacrimalia* [78], сохраняющихся и у взрослых рыб [71]. У *Percoidei* закладка элементов окологлазничного кольца происходит в той же последовательности, что и у нототениевидных [15], образуется полное окологлазничное кольцо, состоящее из *lacrimale* и 4–5 *postlacrimalia* [41]. У взрослых представителей примитивных семейств *Trachinoidei* – *Cheimarrichthyidae* и *Pinguipedidae* – число элементов окологлазничного кольца возрастает до 7–8 [56]. Судя по рисункам Макдоуэлла [56, рис. 3, 8] и по экземпляру *Parapercis allporti*, и *lacrimale*, и *postlacrimalia* у этих рыб маленькие и разобщены между собой небольшими промежутками, то есть эти семейства демонстрируют значительно более продвинутое строение по отношению к генерализованному перкоидному типу, чем примитивные нототениевидные.

Важной отличительной особенностью большинства нототениевидных рыб, за исключением представителей семейства *Bovichtidae*, является ранняя закладка *quadratojugale*, впоследствии образующего задний отросток *quadratum*, по отношению к другим костным элементам подвеса, в том числе и *quadratum* [17] (рис. 1а). У других костистых рыб, закладка *quadratojugale* всегда появляется после начала окостенения замещающего участка *quadratum* [27] (рис. 1б, в, г).

В онтогенезе *Bovichtidae* отмечено довольно существенное развитие задней лопасти *ectopterygoideum*, которая удлиняется и у взрослых рыб сзади изнутри сочленяется с *metapterygoideum* [7, 14] (рис. 1б). У остальных нототениевидных рыб *ectopterygoideum* характеризуется более поздней закладкой и никогда не образует задней лопасти для сочленения с *metapterygoideum* (рис. 1а). Сходный тип развития этой кости отмечен у *Zoarcoidei* [23, 16] (рис. 1е) и у *Blennioidei s.str.* [62, 78]. У взрослых рыб этих подотрядов также не отмечено сочленение *ecto*- и *metapterygoideum* [20, 26, 70, 71]. Разобщены эти элементы и у взрослых представителей семейств *Cheimarrichthyidae* и *Pinguipedidae* из подотряда *Trachinoidei* [7, 56]. Вместе с тем, в онтогенезе *Percoidei* [15] отмечена сходная с *Bovictus* особенность развития *ectopterygoideum*, в результате которой формируется сочленение *ecto*- и *metapterygoideum* (рис. 1г), по-видимому, представляющее собой предковый признак.

У нототениевидных отмечена ранняя закладка *operculum*, на котором происходит развитие верхнего отростка, осуществляющего у взрослых рыб связь этой кости с *supracleithrum* [7] (рис. 1а, б). Верхний отросток *operculum*

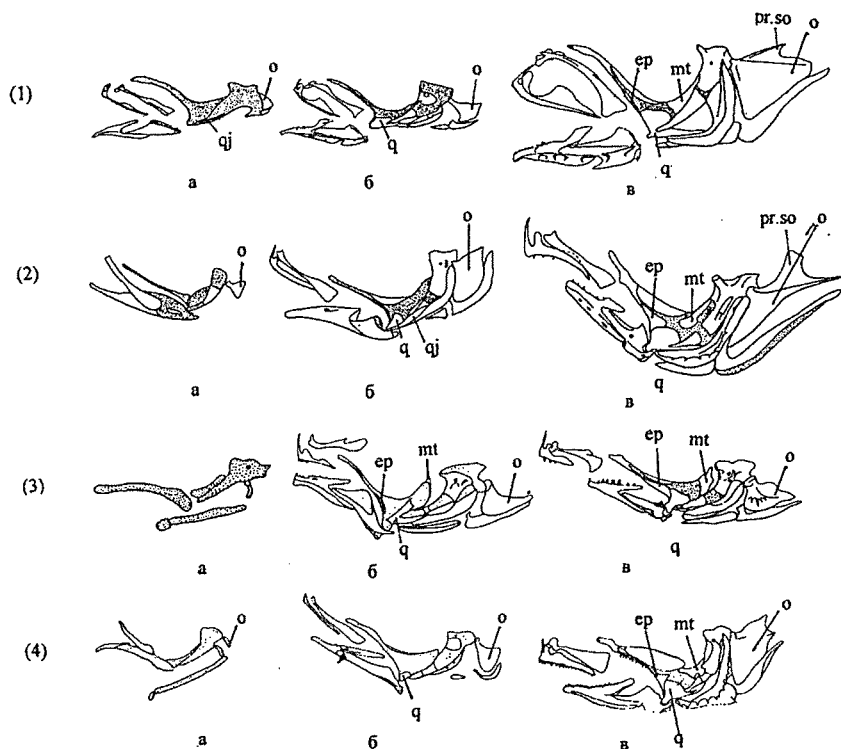


Рис. 1. Развитие спланхнокраниума (1) *Pleuragramma antarcticum* при TL 18,9 мм (а), 33 мм (б) и 76,2 мм (в); (2) *Bovictus angustifrons* при TL 6,3 мм (а), 9,0 мм (б) и SL 16,5 мм; (3) *Zoarces viviparus* при TL 11 мм (а), 15,3 мм (б) и 32,5 мм (в); (4) *Perca fluviatilis* при TL 5,5 мм (а), 9,5 мм (б) и 16,8 (в) мм. ep — ectopterygoideum; mt — metapterygoideum; o — operculum; pr.so — верхний отросток operculum; q — quadratum; qj — quadratojugale.

не развивается у представителей других рассматриваемых здесь подотрядов [7, 15—16, 20, 22—23, 26, 37—38, 48, 50, 54, 56, 70—71, 77] (рис. 1в, г).

Среди нототениевидных рыб лишь *Bovictus* характеризуется появлением зубов на *epibranchiale* 3 [14], которые также отмечены у взрослых рыб из двух других родов *Bovichtidae* [46, 45]. Из других рассматриваемых здесь подотрядов окунеобразных развитие зубов на *epibranchiale* 3 отмечено лишь у наиболее примитивного подотряда *Percoidei* [15, 37—38, 48, 50, 54, 77].

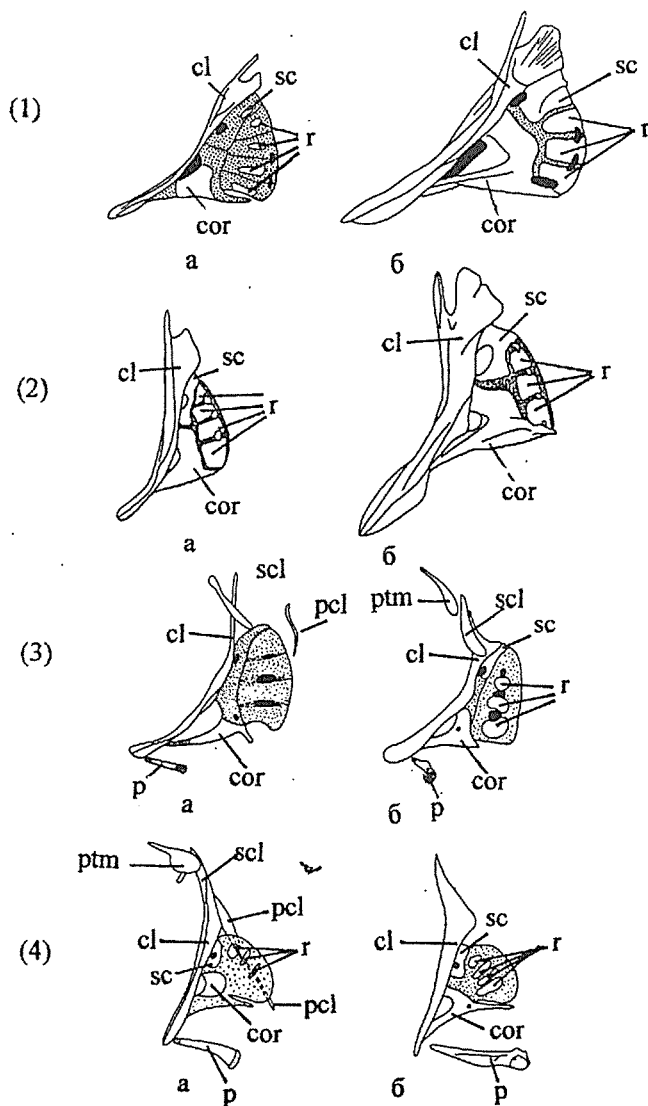


Рис. 2. Развитие скелета грудного плавника (1) *Notothenia neglecta* при TL 24 мм (a) и 60 мм (б); (2) *Bovictus angustifrons* при TL 16,5 мм (a) и *B. chilensis* при SL 43,4 мм (б); (3) *Zoarces viviparus* при TL 15,3 мм (a) и 32,5 мм (б); (4) *Perca fluviatilis* при TL 14,0 мм (a) и 16,8 мм (б). cl — cleithrum, cor — coracoideum, p — pelvis; pcl — postcleithrum; ptm — posttemporale; r — radiale, sc — scapula; scl — supracleithrum.

У большинства представителей *Notothenioidei* в скелете жаберных дуг происходит закладка трех *pharyngobranchialia*, лишь у видов семейства *Channichthyidae* закладываются три зубные пластинки, которые в процессе развития в онтогенезе прикрепляются к двум замещающим костным элементам — *pharyngobranchialia* 2 и 3. Сходные процессы образования трех или двух *pharyngobranchialia* отмечены в онтогенезе [16] и у взрослых представителей *Zoarcoidei* [21, 26]. Три *pharyngobranchialia* найдены у взрослых *Cheimarrichthyidae* и *Parapercidae* из *Trachinoidei* [56, собственные данные]. У *Blennioidei* первоначально закладываются хрящевые *pharyngobranchialia* 2-4, из которых окостеневает лишь среднее, а переднее и заднее *pharyngobranchialia* прикрепляются к нему как хрящевые чашечки [62]. Лишь у *Percoidei* происходит закладка и развитие всех четырех *pharyngobranchialia*, что рассматривается как исходное состояние для окунеобразных [15, 37–38, 48, 50, 54, 77].

Закладка в онтогенезе четырех свободных радиалий и последующее слияние верхней из них со *scapula* отмечены у всех видов подотряда *Notothenioidei* [2, 12, 66 и др.] (рис. 2а, б). Подавляющее большинство других представителей *Blennioidei s.l.*, а также *Percoidei* характеризуются закладкой и сохранением у взрослых рыб четырех свободных радиалий [21, 41, 70, 71, 26, 22 и др.] (рис. 2в, г). Исключение представляет *Hemerocoetes* (*Trachinoidei*) [41, 63].

Радиалии нототениевидных рыб закладываются и развиваются как крупные плоские пластинки, ширина которых обычно равна или несколько меньше их длины. При этом у большинства нототениевидных все три радиалии прикрепляются к заднему краю *coracoideum*, лишь у видов наиболее примитивных семейств *Bovichtidae* и *Pseudaphritidae* верхняя радиалия отделена от *coracoideum* нижним краем *scapula* (рис. 2а, б). У *Zoarcoidei* отмечено сходное развитие радиалий [16, 23]. Форма радиалий у взрослых *Zoarcoidei* и *Trispinacidae*, как у нототениевидных, а распределение радиалий сходно с таковым у *Bovichtidae* и *Pseudaphritidae* [21, 26] (рис. 2в). У *Blennioidei s.str.* радиалии грудного плавника очень крупные, сильно удлинены и вырезаны с боков [41] и распределены, как у *Zoarcoidei*. У взрослых *Percoidei* радиалии палочковидные, их длина намного превышает ширину. Они достаточно мелкие и прикрепляются к *scapula* и *coracoideum* в отношении три к одной [66] (рис. 2г). У взрослых *Pinguipedidae* и *Cheimarrichthyidae*, а также у остальных *Trachinoidei* ширина радиалий грудного плавника больше их длины, они очень малы и распределяются между *scapula* и *coracoideum* в отношении две с половиной к полутора [56, 63] (рис. 2д).

У *Bovictus* из наиболее примитивного семейства нототениевидных *Bovichtidae* в онтогенезе закладываются два *postcleithra* (рис. 2б). По-види-

тому, эта особенность строения характерна и для других родов этого семейства, по крайней мере, Балушкин [4, 5] указывает наличие *postcleithrum* в диагнозе *Bovichtidae*. Среди остальных представителей *Notothenioidei* лишь *Eleginops* из монотипического семейства *Eleginopsidae* характеризуется присутствием одного верхнего *postcleithrum* [4, 5]. Закладка двух *postcleithra* встречается у всех *Percoidei* (рис. 2е), *Pinguipedidae*, *Cheimarrichthyidae*, *Blennioidei*, большинства *Zoarcoidei* (рис. 2в) и *Trispinacidae* и обычно рассматривается как плезиоморфия [21, 41 и др.].

Большое значение в систематике окунеобразных рыб придается особенностям строения *pelvis* [41, 52, 58, 59 и др.]. Как показывают результаты сравнительного анализа развития этой кости у рассматриваемых здесь групп рыб и ее строения у взрослых рыб, существенные различия в ее строении у разных подотрядов обусловлены не столько изменением последовательности закладки, сколько морфогенетическими преобразованиями. Так, у *Percoidei* закладка кости начинается в центре хрящевой закладки, и развивается вперед и назад, в результате чего образуется удлинённая и относительно утончённая кость с хорошо развитыми задним и медиальным отростками (рис. 2е). При этом задний конец *pelvis* заходит назад за основание грудного плавника. У всех *Blennioidei s.l.* основание брюшного плавника расположено перед основанием грудного плавника [41, 58, 59 и др.], а задний отросток *pelvis* развивается лишь в семействах *Pinguipedidae* и *Cheimarrichthyidae*, насколько можно судить по строению этой кости у *P.allporti*. Особенностью развития *pelvis* у подотрядов *Notothenioidei* и *Zoarcoidei* является появление дополнительного центра окостенения, образующего медиальную лопасть кости [13, 16]. Эта лопасть весьма сильно развита у взрослых нототениевидных, особенно у представителей примитивного семейства *Bovichtidae*, в результате чего основания брюшных плавников широко разделены между собой [4, 5]. У *Zoarcoidei* медиальная лопасть кости мало выражена и дополнена верхним и нижним медиальными отростками, хорошо развитыми у *Bathymaster* и почти не развитыми в более продвинутых семействах (рис. 2в). Из других *Blennioidei s.l.* хорошо развитый медиальный отросток *pelvis* есть у *Pinguipedidae*. У *Blennioidei s.str.* задний и медиальный отростки *pelvis* отсутствуют, а развитие и строение *pelvis* у взрослых рыб существенно отличаются от таковых у других *Blennioidei s.l.* [62, 79, 70].

Общее число позвонков у нототениевидных рыб изменяется в довольно широких пределах от 36—41 у представителей семейств *Bovichtidae*, *Pseudaphritidae*, *Artedidraconidae* и *Harpagiferidae* до 79 у некоторых *Bathydraconidae* и *Channichthyidae*. Из двух наиболее примитивных семейств нототениевидных рыб наименьшим числом позвонков обладают

Bovichtidae (37–41). У представителей *Zoarcoidei* и *Blennioidei* число позвонков изменяется от 43 до 250 [21] и от 28 до 113 соответственно. У *Trispinax* 37–40 позвонков [22]. Исходное число позвонков для *Percoidei* – 24 [29, 66 и др.]. У *Pinguipedidae* и *Cheimarrichthyidae* число позвонков варьирует от 30 до 38 [66].

Среди нототениевидных рыб *praedorsale* встречается лишь у *Pseudaphritis urvilli* из *Pseudaphritidae*. Оно располагается между остистыми отростками второго и третьего позвонков, в то же время первый птеригиофор первого спинного плавника смещен назад и расположен между четвертым-пятым или пятым-шестым остистыми отростками [5]. У большинства нототениевидных рыб первый птеригиофор расположен между остистыми отростками второго и третьего позвонков [5], как и у наиболее генерализованных окунеобразных [48]. У видов семейства *Bovichtidae* один-два первых птеригиофора первого спинного плавника заходят в промежуток между черепом и первым остистым отростком, а у *Harpagiferidae* и некоторых родов *Artedidraconidae* – между первым и вторым остистыми отростками [10]. Из других рассматриваемых здесь *Blennioidei s.l.* наличие трех *praedorsalia* отмечено лишь у *Cheimarrichthyidae* [66], у которого эти кости расположены, начиная от черепа. Ригэн указывает на наличие одной *praedorsale* у видов *Pinguipedidae*. Однако, обнаружить эту кость не удалось ни у *P.allporti*, ни на рентгенограммах других видов *Parapercis* из коллекции ЗИН РАН (Назаркин, персональное сообщение), ни на рентгенограммах двух видов *Parapercis* в Fish Base [39], поэтому, очевидно, наличие *praedorsalia* у рыб этого рода характеризуется изменчивостью. У различных *Zoarcoidei* происходит процесс сдвигания первого птеригиофора из промежутка между вторым и третьим остистыми отростками в промежуток между первым и вторым остистыми отростками [21], и далее первый или первый и второй птеригофоры помещаются между черепом и первым остистым отростком [16]. Сходным развитием передней части первого спинного плавника характеризуются *Blennioidei s.str.* [78]. У *Trispinacidae* *praedorsalia* отсутствуют. У примитивных *Percoidei* имеется три *praedorsalia*, расположенных в различных комбинациях между черепом и остистым отростком третьего позвонка. По мере возрастания продвинутости семейств *Percoidei* число *praedorsalia* уменьшается до 1-2 [48].

Подавляющее большинство *Notothenioidei* характеризуются развитием невральнотого отростка второго преурального центра той же длины, что и остальные невральные отростки (рис. 3а). Лишь виды *Bovichtidae* отличаются развитием укороченного невральнотого отростка второго преурального центра [4, 5 и др.] (рис. 3б). Из других *Blennioidei s.l.* развитие полного невральнотого отростка отмечено лишь у *Trispinax* [22]. Изученные в этом отношении *Zoarcoidei* (рис. 3в), *Blennioidei s.str.*, *Percoidei* (рис. 2г) и два рас-

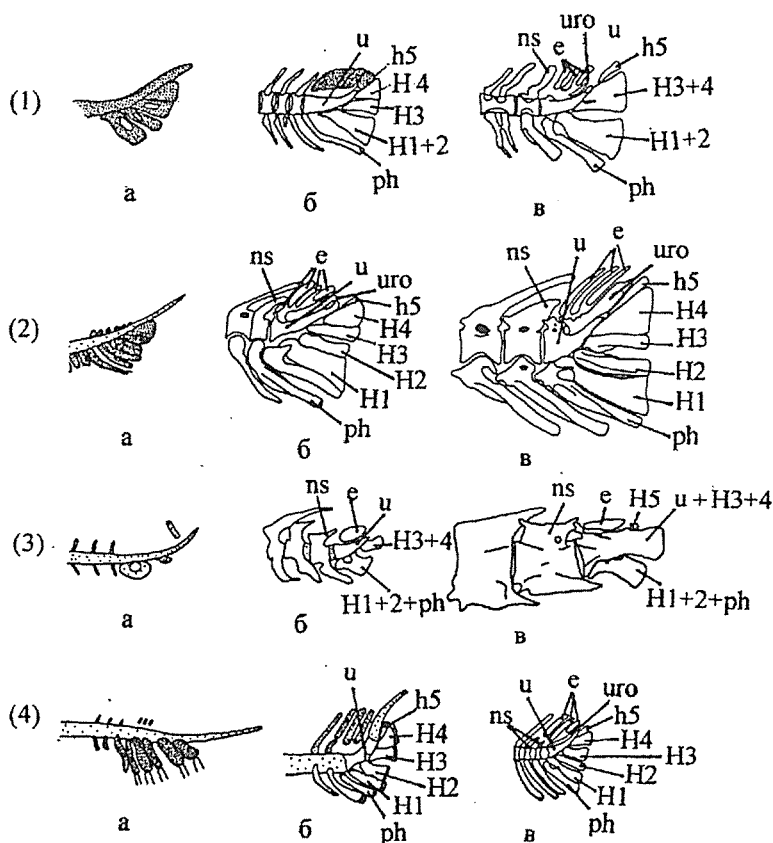


Рис. 3. Развитие скелета хвостового плавника (1) *Pseudotrematomus scotti* при TL 19,5 мм (а), 28 мм (б), 38 мм (в); (2) *Bovictus angustifrons* при TL 6,3 мм (а), SL 14 мм (б) и *B. chilensis* при SL 43,4 мм (в); (3) *Zoarces viviparus* при TL 11 мм (а), 15,3 мм (б) и 32,5 мм (в); *Perca fluviatilis* при TL 10,0 мм (а) 12,1 мм (б) и 16,8 мм (в). e — epurale, h (H) — hypurale; ns — невральный отросток; ph — parhypurale; u — urostyle, uro — uroneurale.

смаатриваемых здесь семейства *Trachinoidei* имеют укороченный невраль- ный отросток [41 и др.], что рассматривается как плезиоморфное состоя- ние этого признака.

У нототениевидных уростилярный центр появляется в онтогенезе дор- зально по отношению к хорде в виде тонкой полоски кости [17]. Никто из исследователей, занимавшихся этим вопросом, не упоминал о подобной фор- ме закладки уростиля у других окунеобразных [69]. Наши данные по разви-

тию скелета хвостового плавника у *Zoarces* [16] свидетельствуют, что у этого вида уростилярный центр сразу образуется в виде цельного покровного окостенения. У *Perca fluviatilis* появление уростиля отмечено с двух сторон от хорды, после чего латеральные закладки сливаются сверху и снизу [15].

У большинства нототениевидных в скелете хвостового плавника *parhypurale* является свободным элементом на протяжении всего онтогенеза [4, 12 и др.] (рис. 3а, б). Исключение составляет лишь *Harpagifer* (*Harpagiferidae*), у которого закладка *parhypurale* сливается с гипаксиальным *hypurale*. У примитивных представителей *Zoarcoidei* имеется закладка *parhypurale*, которая позднее сливается с гипаксиальным *hypurale* [21, 23], а у более продвинутых *Zoarcoidei* [16] (рис. 3в) и у *Blennioidei* [62, 78] закладка *parhypurale* отсутствует. У *Trispinax parhypurale* также сливается с гипаксиальным *hypurale* [22]. *Percoidei* [35, 15 и др.] (рис. 3г), а также, очевидно, *Cheimarrichthyidae* и *Pinguipedidae* [41, 56] имеют самостоятельную закладку *parhypurale*, которая сохраняется у них и во взрослом состоянии.

У представителей *Notothenioidei*, *Trachinoidei* и *Percoidei mesethmoideum* расположено к основанию черепа под острым (положительным) углом. У *Zoarcoidei* обращает на себя внимание тупой (отрицательный) угол наклона закладки *mesethmoideum* по отношению к основанию черепа [16], который сохраняется и у взрослых рыб [41]. Из остальных *Blennioidei s.l.* сходное, почти вертикальное положение закладки *mesethmoideum* отмечено у *Chasmodes saburrae* из *Blennioidei s.str.* [62]. У *Blennioidei s.str.* вертикальное положение *mesethmoideum* сохраняется у взрослых рыб [70].

Одним из диагностических признаков нототениевидных рыб является наличие лишь одной пары ноздрей [44, 60–61, 67–68 и др.]. У *Zoarcoidei* также происходит закладка лишь передней пары ноздрей (16). У *Percoidei*, а также *Trachinoidei* и *Blennioidei s.str.* закладываются и сохраняются две пары ноздрей [41, 56, 71].

КЛАДИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Таксон-признаковая матрица включает 8 таксонов и 27 признаков (табл. 1). В качестве внешней группы принят подотряд *Percoidei*. Множественные признаки были кодированы как аддитивные (ордированные). Матрица обработана при помощи компьютерной программы PAUP-3.1. Получено 3 дерева длиной 56, $CI=0,804$, $RI=0,621$ (рис. 4).

В результате кладистического анализа установлено, что семейства *Pinguipedidae* и *Cheimarrichthyidae* подотряда *Trachinoidei* характеризуется тремя апоморфиями: (2) закладка более пяти *infraorbitalia*, [12 (2)] развитие маленьких широких радиалий в скелете грудного плавника, (26) развитие нескольких птеригиофоров перед первой гемальной дугой. Подотряды *Notothenioidei*, *Blennioidei* и *Zoarcoidei*, а также семейство *Trispinacidae* отделе-

Таксон-признаковая матрица

Таксоны/ Признаки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Percoidei</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pinguipedidae u Cheimarrichthyidae</i>	0	1	?	1	0	01	1	0	1
<i>Bovichtidae</i>	1	0	0	0	0	0	1	1	0
<i>Pseudaphritidae</i>	1	0	1	1	0	0	1	1	1
Остальные <i>Notothenioidei</i>	1	01	1	1	1	1	1	1	1
<i>Zoarcoidei</i>	1	1	0	1	01	01	1	0	1
<i>Blennioidei s.str.</i>	1	0	0	1	1	1	1	0	1
<i>Trispinacidae</i>	1	?	?	?	0	0	0	0	?

Таксоны/ Признаки	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>Percoidei</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pinguipedidae u Cheimarrichthyidae</i>	1	01	1	0	0	0	0	0	01
<i>Bovichtidae</i>	1	1	2	1	1	1	1	1	1
<i>Pseudaphritidae</i>	1	1	2	1	1	1	1	1	2
Остальные <i>Notothenioidei</i>	1	1	2	1	1	1	1	1	1
<i>Zoarcoidei</i>	1	01	2	0	1	01	1	1	1
<i>Blennioidei s.str.</i>	2	0	2	0	1	1	0	1	1
<i>Trispinacidae</i>	?	0	2	0	?	?	?	1	1

Таксоны/ Признаки	19	20	21	22	23	24	25	26	27
<i>Percoidei</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pinguipedidae u Cheimarrichthyidae</i>	0	0	0	?	0	0	0	1	0
<i>Bovichtidae</i>	1	1	0	1	0	1	0	0	0
<i>Pseudaphritidae</i>	2	0	1	1	0	1	0	0	0
Остальные <i>Notothenioidei</i>	0	1	1	1	01	1	01	0	0
<i>Zoarcoidei</i>	01	0	0	0	1	1	1	1	1
<i>Blennioidei s.str.</i>	01	1	0	0	1	0	1	0	1
<i>Trispinacidae</i>	0	?	1	?	1	?	?	0	?

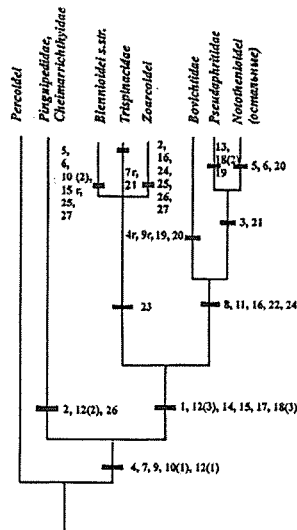


Рис. 4. Кладограмма родственных отношений подотрядов *Blennioidei s.l.*

ны от *Trachinoidei* четырьмя апоморфиями: (1) гребень *supraoccipitale* не выходит в верхний профиль черепа; 12(2) развитие крупных радиалий (2-3 на *coracoideum*); (14) задний отросток *pelvis* не развивается; (17) закладка более 36 позвонков. Подотряд *Notothenioidei* характеризуется пятью апоморфиями: (8) развитие верхнего отростка *operculum*; (11) слияние верхней радиалии со *scapula*; (16) наличие медиального центра окостенения *pelvis*; (22) появление *uostyle* как тонкой полоски кости вдоль верхнего края хорды; (24) развитие одной пары ноздрей. Большинство семейств *Notothenioidei* обособляются от *Bovichtidae* по двум апоморфиям: (3) ранняя закладка *quadratojugale*, (21) развитие длинного невральнотого отростка преурального центра в скелете хвостового плавника. Подотряды *Zoarcoidei*, *Blennioidei s.str.* и семейство *Trispinacidae* объединяются одной апоморфией: (23) слияние закладки *parhypurale* с гипаксиальной гипуральной лопастью или ее отсутствие.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование показало, что подотряд *Trachinoidei* является сестринской группой для трех остальных подотрядов *Blennioidei s.l.*: *Notothenioidei*, *Zoarcoidei* и *Blennioidei s.str.* *Notothenioidei* представляют собой самостоятельный подотряд *Blennioidei s.l.*, сестринской группой для которого являются подотряды *Zoarcoidei* и *Blennioidei s.str.*, а также семейство *Trispinacidae*. В подотряде *Notothenioidei* семейство *Bovichtidae* оказалось сестринской группой по отношению к остальным семействам нототениевид-

ных. По результатам кладистического анализа семейство *Trispinacidae* не относится к подотряду *Trachinoidei*, а связано с подотрядами *Zoarcoidei* и *Blennioidei*. Выяснение родственных отношений этих таксонов не входило в задачу исследования. Однако, несмотря на наличие в кладограмме нерешенной трихотомии по поводу их взаимоотношений, можно предположить, что семейство *Trispinacidae* ближе к *Zoarcoidei*, чем к *Blennioidei s.str.* В этом убеждает ряд не включенных в анализ признаков, сходных у *Trispinacidae* и *Zoarcoidei*: наличие полного окологлазничного кольца, а также форма радиалий грудного плавника и *pelvis*. Следует отметить, что Назаркин [22] также отмечает значительное сходство *Trispinacidae* и *Zoarcoidei*, но не включает семейство *Trispinacidae* в *Zoarcoidei* в связи с наличием у *Trispinax* шипиков на *praeoperculum*, а также ктеноидной чешуи, которая, тем не менее, есть и у видов семейства *Bathymasteridae* из *Zoarcoidei*.

Полученная кладограмма не подтверждает ни существующие в настоящее время точки зрения о происхождении *Notothenioidei* из *Trachinoidei* [44] или от общих с *Paraperacidae* предков независимо от *Zoarcoidei* и *Blennioidei* [5], ни мнение о близком родстве *Notothenioidei* и *Zoarcoidei* [25]. Чтобы оценить вероятность полученной схемы родственных отношений *Blennioidei s.l.*, представляется интересным сопоставить данные кладистического анализа и географического распространения рассматриваемых таксонов, а также проследить исторические аспекты их становления. В настоящее время *Notothenioidei*, за небольшим исключением, населяют антарктические и субантарктические воды [1, 60–61, 67–68 и др]. Основными областями распространения *Zoarcoidei* являются полярные и в меньшей степени умеренные воды северного и южного полушарий [25, 41 и др.], причем южные *Zoarcoidei* представляют собой продвинутые таксоны, вторично заселившие воды Антарктики [25]. Представители подотряда *Blennioidei s.str.*, главным образом, населяют тропические воды [41, 70]. Примитивные *Trachinoidei* из семейств *Pinguipedidae* и *Cheimarrichthyidae* в основном широко распространены в бассейне Индийского океана и вдоль западного побережья Тихого океана от южного побережья Австралии и Новой Зеландии на юге до Японского моря на севере [19, 30, 56], причем некоторые виды *Pinguipedidae* характеризуются довольно широкими ареалами, например, *Paraperacis xanthozona* встречается от плато Квинслэнд у восточного побережья Австралии до берегов Японии, *P.hexophthalma* – от плато Квинслэнд до Северного Китая [30]. При рассмотрении вопроса о распространении подотрядов *Blennioidei s.l.* в исторической ретроспективе следует принять во внимание, что во время появления первых нототениевидных в раннем эоцене [1, 25, 57, 68 и др.] Антарктида и Австралия были расположены ближе друг к другу и севернее, чем в настоящее время. Можно с большой степенью уве-

ренности предположить, что обмен фаунами этих двух континентов осуществлялся в то время достаточно свободно. Об этом свидетельствует и современное распространение представителей двух наиболее примитивных семейств нототениевидных — *Bovichtidae* и *Pseudaphritidae* — у берегов Южной Австралии и Тасмании [43, 51, 57 и др.). Также не вызывает сомнений, что более теплый климат раннего эоцена [32] способствовал существованию более широких, чем в настоящее время, ареалов окунеобразных рыб не только на юге, но и на севере. Эти факты, а также широкое современное распространение примитивных *Trachinoidei*, указывают, что нототениевидно-зоаркоидно-бленниеvidная ветвь *Blennioidei s.l.* могла произойти от общих предков с примитивными *Trachinoidei*, характеризовавшихся широким ареалом. От этих возможных предков могли обособиться нототениевидные на юге и зоаркоидные-бленниеvidные ближе к северу, занимая в этих районах сходные экологические ниши.

В настоящее время не существует единого мнения о систематическом положении семейства *Bovichtidae* в подотряде *Notothenioidei*. Так, Балашкин [4, 5] считает наиболее примитивным семейством нототениевидных *Pseudaphritidae*. Ряд авторов [31, 53] на основании данных по строению висцерального скелета [7], молекулярно-биологического [53] и кариологического анализов [64] выделяют семейство *Bovichtidae* из подотряда *Notothenioidei* без указания его систематического положения и предлагают новый диагноз подотряда *Notothenioidei*. Однако, по данным онтогенетического и кладистического анализа семейство *Bovichtidae* сохраняет большинство диагностических признаков нототениевидных рыб, к которым относятся слияние в онтогенезе верхней радиалии со *scapula*, развитие одной пары ноздрей, развитие верхнего отростка *operculum*, появление *urostyle* в виде узкой полоски кости над хордой, и должно быть сохранено в подотряде *Notothenioidei*. Развитие скелета *Bovictus angustifrons* из семейства *Bovichtidae*, по-видимому, наиболее сходно с таковым у предков нототениевидных [12, 14], при этом наиболее важным отличием *Bovictus* от других *Notothenioidei* является сохранение у него предкового типа закладки *quadratum*. Судя по сходным с *Bovictus* особенностям строения скелета [4, 5, 7, 45], сходный тип развития, скорее всего, присущ и остальным представителям *Bovichtidae*. Представители *Bovichtidae* отличаются от других нототениевидных не только рядом плезиоморфных, но и апоморфных признаков: положение первого птеригофора первого спинного плавника между черепом и первым остистым отростком; наличие канальцев второго и третьего порядка сейсмочувствительной системы головы; наличие утолщенных и обособленных дистально нижних лучей грудного плавника [5]. С моей точки зрения, наличие существенных различий в строении и раз-

витии скелета; а также в последовательностях ДНК и хромосомном наборе (см. выше) дает возможность повысить таксономический ранг семейства *Bovichtidae* до надсемейственного. В таком случае система подотряда *Notothenioidei* будет изменена следующим образом.

Подотряд *Notothenioidei*

Диагноз. Одна пара ноздрей. В нев록раниуме гребень *supraoccipitale* не выходит за верхний профиль черепа. Есть верхний отросток *operculum*. Есть три-две *pharyngobranchialia*. Три радиалии грудного плавника крупные (2-3 на *coracoideum*). Задний и медиальный отросток *pelvis* не развиваются. Есть медиальный центр окостенения *pelvis*. *Urostyle* появляется как тонкая полоска кости вдоль верхнего края хорды. Нет слияния закладки *parhypurale* с гипаксиальной гипуральной лопастью (за исключением *Harpagiferidae*). Число позвонков не менее 36.

Состав: два надсемейства.

Надсемейство *Bovichtioidea*

Диагноз. Есть каналыцы второго и третьего порядка сейсмосенсорной системы головы. Есть сочленение *ectopterygoideum* и *metapterygoideum*. Закладка *quadratojugale* появляется после закладки *quadratum*. Есть зубы на *epibranchiale* 3. Нижние лучи грудного плавника утолщены и обособлены дистально. Два *postcleithra*. Один-два первых птеригофора первого спинного плавника расположены перед остистым отростком первого позвонка. Невральный отросток второго преурального центра в скелете хвостового плавника укорочен.

Состав: семейство *Bovichtidae*.

Надсемейство *Notothenioidea*

Диагноз. Нет каналцев второго и третьего порядка сейсмосенсорной системы головы. Нет сочленения *ectopterygoideum* и *metapterygoideum*. *Quadratojugale* появляется до закладки *quadratum*. Нет зубов на *epibranchiale* 3. Нет утолщенных и обособленных дистально нижних лучей грудного плавника. *Postcleithrum* одно или отсутствует. Первый птеригофор первого спинного плавника расположен за остистым отростком первого позвонка или далее. Невральный отросток преурального центра в скелете хвостового плавника удлинён.

Состав: семейства *Pseudaphritidae*, *Eleginopsidae*, *Nototheniidae*, *Harpagiferidae*, *Artedidraconidae*, *Bathydraconidae*, *Channichthyidae*.

Благодарности. Приношу искреннюю благодарность сотрудникам ЗИН РАН А.О.Аверьянову за помощь при проведении кладистического анализа, М.В.Назаркину и Е.П.Ворониной за критическое прочтение рукописи статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке от подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан».

Поступила 24.11.2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрияшев А.П. Обзор фауны рыб Антарктики // Исследования фауны морей. —1964. —Вып. 2(40). —С. 335–386.
2. Андрияшев А.П. Общий обзор фауны донных рыб Антарктики // Морфология и распространение рыб Южного океана. —Тр. Зоол. ин-та АН СССР. —1986. —Т. 153. —С. 9–45.
3. Балушкин А.В. Морфологические основы систематики и филогении нототениевых рыб. —Л.: Изд-во Зоол. ин-та АН СССР, 1984. —141 с.
4. Балушкин А.В. Классификация, родственные связи и происхождение семейств подотряда нототениевидных рыб (Notothenioidei, Perciformes)//Вопр. ихтиологии. —1992. —Т. 32. —Вып. 3. —С. 3–19.
5. Балушкин А.В. Морфология, классификация и эволюция нототениевидных рыб Южного океана. —Авторефер. дис. д-ра биол. наук. —СПб., 1997. —52 с.
6. Балушкин А.В., Воскобойникова О.С. Система и филогения антарктических плосконосовых рыб семейства Bathydraconidae (Notothenioidei, Perciformes)//Вопр. ихтиологии. —1995. —Т. 35. —Вып. 2. —С. 147–155.
7. Воскобойникова О.С. Эволюционные преобразования висцерального скелета и вопросы филогении нототениевых рыб (Nototheniidae) // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. —1986. —Т. 153. —С. 44–55.
8. Воскобойникова О.С. Сравнительная остеология и филогения плосконосовых рыб подсемейства Bathydraconinae: Тез. докл. конференции «Биологические ресурсы талассобатической зоны Мирового океана». —М.: ВНИРО, 1988. —С. 10–11.
9. Воскобойникова О.С. О темпах индивидуального развития костного скелета одиннадцати видов нототениевых рыб (Nototheniidae)//Вопр. ихтиологии. —1994. —Т. 34. —Вып. 4. —С. 501–508.
10. Воскобойникова О.С. Развитие костного скелета в онтогенезе Harpagifer antarcticus (Harpagiferidae, Notothenioidei)//Вопросы ихтиологии. —1998. —Т. 38. —Вып. 4. —С. 469–478.
11. Воскобойникова О.С. Сравнительная остеология *Dacodraco hunteri* и его положение в системе белокровных рыб семейства Channichthyidae (Notothenioidei)// Зоол. журнал. —2000. —Т. Вып. 3. —С. 321–332.
12. Воскобойникова О.С. Эволюционное значение гетерохроний в развитии костного скелета рыб подотряда Notothenioidei (Perciformes)//Вопр. ихтиологии. —2001. —Т. 41. —Вып. 4. —С. 455–464.
13. Воскобойникова О.С. Развитие костного скелета в онтогенезе *Lindbergichthys mizops* (Nototheniidae, Perciformes)//Вопр. ихтиологии. —2002. —Т. 42. —Вып. 1. —С. 93–100.
14. Воскобойникова О.С., Брюс Б. Развитие костного скелета в онтогенезе австралийского щекорога *Bovichtus angustifrons* (Bovichtidae, Notothenioidei) со сравнительными замечаниями по развитию костного скелета конголли *Pseudaphritis urvilli* (Pseudaphritidae)//Вопр. ихтиологии. —2001. —Т. 41. —Вып. —С. 62–71.
15. Воскобойникова О.С., Гречанов И.Г. Развитие скелета в онтогенезе речного окуня *Perca fluviatilis* (Percidae, Percoidei)//Вопр. ихтиологии. —2002. —Т. 42. —Вып. 3. —С. 368–380.

16. Воскобойникова О.С., Лайус Д.Л. Развитие скелета в онтогенезе бельдюги европейской *Zoarces viviparus* (Zoarcidae, Perciformes)//Вопр.ихтиологии. — 2003. —Т. 43. —Вып. 5. —С. 671—685.
17. Воскобойникова О.С., Малашичев Е.Б., Воронина Е.П. О развитии некоторых костных элементов в онтогенезе пяти видов нототениевых рыб (Notothenioidei)//Вопр. ихтиологии. В печати.
18. Воскобойникова О.С., Терещук О.Ю. Морфологические преобразования костного скелета чешуйчатого трематома *Pseudotrematomus eulipidotus* в онтогенезе//Биол. моря. —1991. —№ 6. —С. 70—79.
19. Линдберг Г.У., Красюкова З.В. Рыбы Японского моря и сопредельных частей Охотского и Желтого морей. Часть 3. Teleostomi. XXIX. Perciformes. 1. Percidae (XV. Сем. Serranidae — CXLIV. Сем. Champsodontidae). —Л.: Изд. Наука, 1969. — 479 с.
20. Макушок В.М. Морфологические основы системы стихеевых и близких к ним семейств рыб (Stichaeoidei, Blennioidei, Pisces) //Тр. Зоол. ин-та АН СССР. —1958. —Т. 25. —С. 3—129.
21. Макушок В.М. Некоторые особенности строения сейсмочувствительной системы северных блений *Stichaeoidei*, *Blennioidei*, *Pisces* // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. —1961. —Т. 63. —С. 225—269.
22. Назаркин М.В. *Trispinax ladae*, gen. Et sp. Nov. — представитель нового семейства трахиновидных рыб Trispinacidae (Perciformes, Trachinoidei) из миоцена острова Сахалин//Вопр. ихтиологии. —2002. —Т. 42. —Вып. 4. —С. 459—467.
23. Павлов Д.А. Развитие скелета головы и поясов парных конечностей зубатки *Anarhichas lupus* при различных температурных режимах//Вопр. ихтиологии. —1997. —Т. 37. —Вып. 3. —С. 366—376.
24. Andersen N.C. Genera and subfamilies of the family Nototheniidae (Pisces, Perciformes) from the Antarctic and Subantarctic//Steenstrupia. —1984. —Vol.10. —№ 1. —P. 1—34.
25. Anderson M.E. *Zoarcidae* // The fishes of the Southern Ocean. (Gon O. & P.C. Heemstra, eds.), 1990. —P. 256—276.
26. Anderson M.E. Systematics and osteology of the Zoarcidae (Teleostei: Perciformes)//Ichthyol. Bull. J.L.B. Smith Inst. Ichthyol. Grahamstown, South Africa. —1994. —№ 60. —P. 1—120.
27. Arratia G., Schultze H.-P. The palatoquadrate and its ossifications: development and homology within osteichthyans//J. Morphol. —1991. —Vol. 208. —P. 1—81.
28. Bertin L., Arambourg C. Super-ordre des teleosteens: pp.2204—2500 // Grasse P.E. (ed.), (Agnathes et Poissons) Traite de Zoologie. Masson et Cie, 1967—1983. —1958. —Ed. № 13. —Fasc. 3.
29. Boulenger G.A. Notes on the classification of teleostean fishes. I. On the Trachinidae and their allies//Ann. Mag. Nat. Hist. —1901. —Ser. 7. —№ 8. —P. 261—271.
30. Cantwell G.E. A revision of the genus *Parapercis*, family Mugiloididae//Pacif. Sci. —1964. —Vol. 18. —№ 3. —P. 239—280.
31. Chen W.-J., Bonillo C., Lecoindre G. Phylogeny of the Channichthyidae (Notothenioidei, Teleostei) based on two mitochondrial genes//Fishes of Antarctica. (G. di Prisco, E. Pisano, A. Clarke, eds.). Milano, Springer-Verlag Italia, 1998. —P. 287—298.

32. *Clarke A., Johnston I.A.* Evolution and adaptive radiation of Antarctic fishes//Trends Ecol. Evol. —1996. —№11. —P. 212–218.
33. *Eakin R.R.* Osteology and relationships of the fishes of the Antarctic family *Harpagiferidae* (Pisces, Notothenioidei)//Antarct. Res. Ser. Washington. —1981. —Vol. 31. —P. 81–147.
34. *Eschmeyer B.* Catalog of the genera of Recent fishes. —San-Francisco: California academy of Sciences, 1998. —Vol. 3. —P. 1821–2905.
35. *Faustino M., Power D.M.* Development of osteological structures in the sea bream: vertebral column and caudal fin complex//J. Fish Biol. —1998. —Vol. 52. —№ 1. —P. 11–22.
36. *Faustino M., Power D.M.* Development of the pectoral, pelvis, dorsal and anal fins in cultured sea bream//J. Fish Biol. —1999. —Vol. 54. —№ 5. —P. 1094–1110.
37. *Faustino M., Power D.M.* Osteological development of the viscerocranial skeleton in sea bream: alternative ossification strategies in teleost fish//J. Fish Biol. —2001. —Vol. 58. —№ 3. —P. 537–572.
38. *Fritzsche R.A., Johnson G.D.* Early osteological development of white perch and striped bass with emphasis on identification of their larvae//Trans. Amer. Fish. Soc. —1980. —Vol. 109. —P. 387–406.
39. *Froese R., Pauly D.* Editors. WorldmWide Web electronic publication. FishBase. www.fishbase.org, version 14 August 2003.
40. *Gill T.N.* A comparison of antipodal faunas//Mem. Natl. Acad. Sci. Wash. —1893. —Vol. 6. —Mem. 5. —P. 91–124.
41. *Gosline W.A.* The suborders of perciform fishes//Proc. U.S. Nat. Mus. —1968. —Vol. 124. —P. 1–78.
42. *Greenwood P.H., Rosen D.E., Weitzman S.H., Myers G.S.* Phyletic studies of teleostean fishes, with a provisional classification of living forms//Bull. Amer. Mus. Nat. Hist. —1966. —Vol. 131. —№ 4. —P. 339–456.
43. *Hardy G.S.* A revision of *Bovichtus* Cuvier, 1831 (Pisces: Bovichthyidae) from Australia, with description of a new deepwater species from the New Zealand Subantarctic//J. Nat. Hist. —1988. —Vol. 22. —№ 6. —P. 1639–1655.
44. *Hastings Ph.* Relationships of the fishes of the perciform suborder Notothenioidei // Miller R.G. (ed.). History and atlas of the fishes of the Antarctic Ocean. Foresta Institute for Ocean and Mountain Studies. Carson City, Nevada, CA, 1993. —P. 99–107.
45. *Iwami T.* Osteology and relationships of the family Channichthyidae//Mem. Natl. Inst. Polar Res. Ser. E. —1985. —Vol. 36. —P. 1–69.
46. *Iwami T., Abe T.* Gill arches of fishes of the suborder Notothenioidei (Pisces, Perciformes)//Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue. —1984. —Vol. 32. —P. 93–102.
47. *Iwami T., Matsuo A.S., Numanami H.* Topography of the cephalic sensory canal system of the family Channichthyidae (Perciformes, Notothenioidei)//Polar Biosci. —1999. —№ 12. —P. 26–35.
48. *Johnson G.D.* Percoidei: development and relationships // Ontogeny and systematics of fishes (Moser H.G. et al., eds). ASIH Spec. Publ. № 1. Allen Press Inc. Lawrence, K.S. P., 1984. —P. 464–499.
49. *Jordan D.S.* A classification of fishes, including families, and genera as far as known// Stanford Univ. Publ. Univ. ser. Biol. Sci. —1923. —Vol. 3. —№ 2. —P. 79–243.

50. Koumoundouros G., Divanach P., Kentouri M. Development of the skull in *Dentex dentex* (Osteichthyes: Sparidae)//Mar. Biol. —2000. —Vol. 136. —No 1. —P. 175–184.
51. Last P.R., Balushkin A.V., Hutchins J.B. *Halaphritis platycephala* (Notothenioidei: Bovichtidae): a new genus and species of temperate icefish from Southeastern Australis // Copeia. —2002. —№ 2. —P. 433–440.
52. Lauder G.V., Liem K.F. The evolution and interrelationships of the actinopterygian fishes//Bull. Mus. Comp. Zool. —1983. —Vol. 150. —№ 3. —P. 95–197.
53. Lecointre G., Bonillo C., Ozouf-Costaz C., Hureau J.-C. Molecular phylogeny of the Antarctic fishes: paraphyly of the Bovichtidae and no indication for the monophyly of the Notothenioidei (Teleostei)//Polar Biology. —1997. —Vol. 18. —P. 193–208.
54. Lindemann K.C. Development of larvae of the French grunt, *Haemulon flavolineatum*, and comparative development of twenty species of western Atlantic *Haemulon* (Percoidei, Haemulidae)//Bull. Mar. Sci. —1986. —Vol. 39. —№ 3. —P. 673–716.
55. Mabee P.M., Olmstead K.L., Cubbage C.C. An experimental study of intraspecific variation, developmental timing, and heterochrony in fishes//Evolution. —2000. —Vol. 54. —№ 6. —P. 2091–2106.
56. McDowall R.M. Relationships and taxonomy of the New Zealand torrent fish, *Cheimarrichthys fosteri* Haast (Pisces: Mugiloididae)//J. Roy. Soc. N.Z. —1973. —Vol. 3. —№ 2. —P. 199–217.
57. Miller R.G. History and atlas of the fishes of the Antarctic Ocean. —Spec. publ. of Foresta Inst. —1993. —P. 1–792.
58. Nelson J.S. Fishes of the world. —2nd ed. New York. John Wiley & Sons, 1984. —523 p.
59. Nelson J.S. Fishes of the World. —3rd edition. New York. John Wiley & Sons, 1994. —P. i–xv, 1–523.
60. Norman J.R. Coast fishes. Pt. II. The Patagonian Region//Discovery Rep. —1937. —Vol. 16. —P. 1–150.
61. Norman J.R. Coast fishes. Pt. III: The Antarctic Zone//Discovery Rep. —1938. —Vol. 18. —P. 1–105.
62. Peters K.M. Reproductive biology and developmental osteology of the florida blenny, *Chasmodes saburrae* (Perciformes: Blenniidae)//Northeast Gulf Sci. —1981. —Vol. 4. —№ 2. —P. 79–98.
63. Pietch T.W. Phylogenetic relationships of trachinoid fishes of the family Uranoscopidae//Copeia. —1989. —№ 2. —P. 253–303.
64. Pisano E., Ozouf-Costaz C., Prirodina V. Chromosome diversification in Antarctic fish (Notothenioidei) // Fishes of Antarctica. (G. di Prisco, E. Pisano, A. Clarke, eds.). Milano, Springer-Verlag Italia, 1998. —P. 275–286.
65. Potthoff T. Clearing and Staining Techniques// Onthogeny and systematics of Fishes. (Moser H.G. et al., eds), ASIH Spec. Publ. N 1. Allen Press Inc., Lawrence, KS, 1984. —P. 35–37.
66. Regan C.T. The classification of the percoid fishes//Ann. Mag. Nat. Hist. —1913 a. —Ser. 8. —№ 12. —P. 111–145.
67. Regan C.T. The Antarctic fishes of the Scottish National Antarctic Expedition//Trans. Roy. Soc. Edinburgh. —1913. —Vol. 49. —P. 229–292.
68. Regan C.T. Fishes. Brit. Antarct. («Terra Nova») Exped. 1910 // Nat. Hist. Rep. Zool. —1914. —№ 1. —P. 1–54.

69. *Schultze H.-P., Arratia G.* The comparison of the caudal skeleton of teleosts (Actinopterygii: Osteichthyes) // Zool. J. Linnean Soc. — 1989. — Vol. 97. — P. 189–231.
70. *Springer V.G.* Osteology and classification of the fishes of the family Blenniidae // Bull. U.S. Nat. Mus. — 1968. — № 284. — P. 1–85.
71. *Springer V.G.* Definition of the suborder Blennioidei and its included families (Pisces: Perciformes) // Bull. Mar. Sci. — 1993. — Vol. 52. — № 1. — P. 472–495.
72. *Stevens E.G., Watson W., Matarese A.C.* Notothenioidea: development and relationships // Ontogeny and systematics of fishes (Moser H.G. et al., eds). ASIH Spec. Publ. N 1. Allen Press Inc. Lawrence, K.S. P, 1984. — P. 561–564.
73. *Voskoboinikova O.S.* The osteological development of the channichthyids (Notothenioidei) // Cybium. — 1997. — Vol. 21. — № 4. — P. 369–379.
74. *Voskoboinikova O.S.* The osteological development of four species of the antarctic dragonfish (Bathdraconidae, Notothenioidei) // Zoosystematica Rossica. — 1998. — Vol. 7. — № 1. — P. 193–204.
75. *Voskoboinikova O.S., Kellermann A.* The osteological development of nine species of the nototheniids (Notothenioidei, Perciformes) // Cybium. — 1997. — Vol. 21. — № 3. — P. 231–264.
76. *Voskoboinikova O.S., Tereshchuk O.Yu., Kellermann A.* The osteological development of the Antarctic silverfish *Pleuragramma antarcticum* (Nototheniidae, Perciformes) // Cybium. — 1994. — Vol. 18. — № 3. — P. 251–271.
77. *Watson W.* Development of eggs and larvae of the white croaker *Genyonemus lineatus* Aures (Pisces, Sciaenidae) off the southern California coast // Fish. Bull. — 1982. — Vol. 80. — № 3. — P. 403–419.
78. *Watson W.* Larval development of the endemic Hawaiian blennioid, *Enchelyurus brunneolus* (Pisces, Blenniidae: Osmobranchini) // Bull. Mar. Sci. — 1987. — Vol. 41. — № 3. — P. 856–888.

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФАУНЫ МШАНОК МОРЯ УЭДДЕЛЛА, АНТАРКТИКА

Переуглубленный антарктический шельф часто называют царством мшанок. Фауна хейлостомных мшанок обладает высокой степенью эндемизма [10] и уникальными физиологическими адаптациями к жизни в относительно стабильных, суровых условиях антарктических морей, и поэтому представляет большой интерес для морских гидробиологов и брио-зоологов. Фауна мшанок моря Уэдделла до недавнего времени оставалась белым пятном на карте Антарктики.

Море Уэдделла является самым обширным, самым глубоким, самым интересным морем для исследователя и самым тяжелым морем Антарктики для мореплавателя. «Ледовым погребом», «ледовым мешком», «адской дырой» Антарктики называют это море [3]. Тяжелые ледовые условия значительно задержали исследования в море Уэдделла. Однако, благодаря многочисленным экспедициям немецких ученых, именно это море становится одним из самых изученных антарктических морей. В сборах немецкой экспедиции XIII/3 (32 станции и 64 количественные и качественные пробы) (рис. 1) на экспедиционном судне «Полярштерн» в 1996 г. было обнаружено более 400 видов и подвидов мшанок из трех современных отрядов *Cyclostomata*, *Stenostomata*, *Cheilostomata*. До этого исследования данных о фауне мшанок моря Уэдделла не было. Основные районы работ экспедиции находились у м. Норвегия: северо-восточнее, севернее, юго-западнее и западнее мыса; и между м. Весткап и Халли Бей, а также у о. Дрешер. Часть станций была сделана в пределах переуглубленного антарктического шельфа от 118 до 494 м, часть станций в верхней части антарктического склона. Другая часть станций была сделана за пределами шельфа на антарктическом склоне от 504 до 628 м. Были взяты также несколько глубоководных станций от 850 до 2334 м.

Аннотированный список видов мшанок опубликован в Reports on Polar Research [8] (таблицы 4,5) и в сборнике статей «Мшанки Земного Шара» [2]. Поэтому в этой статье большее внимание будет уделено рас-

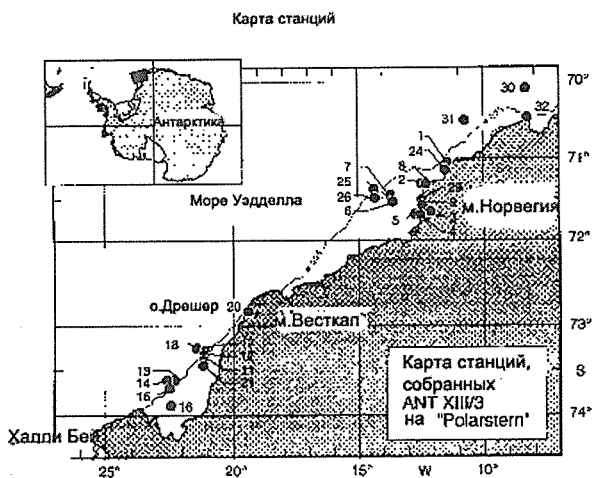


Рис. 1. Станции, сделанные экспедицией на «Полярштерн» в 1996 г. в море Уэдделла.

пределению видов мшанок на антарктическом шельфе в зависимости от глубины, а также сравнению фауны мшанок между двумя исследованными районами с использованием обычных статистических методов.

Следует хотя бы кратко охарактеризовать условия существования фауны в море Уэдделла, что послужит лучшему пониманию полученных результатов.

Переход шельф — верхняя часть океанического склона составляет ключевую зону для понимания происхождения и истории морской бентической биоты (здесь и далее цитируется [5]). В Антарктике эти условия имели особую историю. Начиная с Мела водная температура понижалась более или менее равномерно от $+15 - 20^{\circ}\text{C}$ до современных температур от $+2$ до $-1,8^{\circ}\text{C}$. Антарктический ледяной щит простирался на север и покрывал большую часть шельфовой области. Это вызвало образование аномально глубокого внутреннего шельфового бассейна. Области, подвергнувшиеся этим гляциологическим процессам, должны были перезаселяться после юрмского оледенения. Слово «псевдобатияль» было предложено Андрияшевым [4], чтобы обозначить эти глубоководные условия и их современную фауну.

Крупномасштабная динамика вод антарктической зоны Южного океана характеризуется системой замкнутых циклонических циркуляций, наиболее крупные из которых — круговороты Уэдделла и Росса [1]. Море

Уэдделла — это глубокий океанический залив, имеющий на северо-востоке и востоке свободный водообмен с Атлантическим океаном и соседними районами Антарктики [3]. Круговорот Уэдделла расположен южнее Антарктического полярного фронта и вытянут от Антарктического полуострова приблизительно до 30° в.д.

Имеются следующие геоморфологические черты морских трансект в восточной части моря Уэдделла:

- литоральная область, ниже ледового щита;
- мелководная область до 200 м, близ края шельфового льда, который простирается выше или ниже 200 м изобаты;
- «внутренний склон» псевдобатимальной депрессии на шельфе, достигающий до 600 м;
- шельфовый «подъем» до 200 м;
- «наружный» склон между этим подъемом и большими глубинами.

Преобладающими в море Уэдделла являются глубины более 4000 м (здесь и далее цитируется [3]). Материковая отмель у $17-22^\circ$ з.д. (район наших исследований — *В.Г.*) развита слабо. Зато на юго-западе ее внешний край отстоит на 350 — 500 км. Воды моря Уэдделла подразделяются на три водные массы: поверхностные антарктические, промежуточные теплые глубинные воды и придонные антарктические воды. Поверхностные антарктические — это сравнительно тонкий слой (в среднем 150—200 м) холодных вод, основные характеристики которых определяются полярным положением, суровым климатом, распределением морских льдов, твердым, а не жидким материковым стоком. В зимнее время поверхностные воды обладают однородными характеристиками, а летом делятся на два слоя: верхний, прогретый и распресненный, и нижний, или холодный промежуточный слой. Зимой температура этих вод около $-1,8-1,9^\circ\text{C}$, хотя за пределами льдов и вплоть до антарктической конвергенции температура воды постепенно повышается до $+2,5^\circ\text{C}$. Температура воды на поверхности в разгар антарктического лета достигает $+4-5^\circ\text{C}$ у антарктической конвергенции и понижается до -1°C у кромки льдов. Поверхностные антарктические воды подстилаются теплыми глубинными водами. Переход от одного типа вод к другому проявляется в резком изменении всех океанических характеристик. В этом слое скачка при изменении глубины на 25 м температура воды обычно увеличивается на $1-1,5^\circ\text{C}$, соленость на $0,15-0,20\%$, а содержание кислорода уменьшается на $1-1,5\text{ см}^3/\text{л}$. Если за границу между поверхностными и глубинными слоями принять температуру 0°C , то вблизи антарктической конвергенции она располагается на глубине 250—300 м, к югу в летнее время на 100 м, а у материкового склона более 300 м. Нулевая изотерма примерно совпадает с границей между материковым шельфом и

склоном. Глубина залегания поверхностных вод определяется, главным образом, движением и характеристиками теплых глубинных вод. Теплые глубинные воды вовлекаются в циклоническое вращение, двигаясь в южной части моря с востока на запад, и, таким, образом, проникая в море Уэдделла с теплым глубинным течением в направлении, обусловленном конфигурацией водоема. Распространение и характеристики теплых глубинных вод аналогичны атлантическим глубинным водам в Арктическом бассейне. Придонные антарктические воды характеризуются отрицательными температурами (до -5°C) и более высоким, чем в теплых глубинных водах содержанием кислорода. Эти воды занимают огромный объем и их средняя мощность равна 3000 м. На юго-западе моря Уэдделла сильно развита материковая отмель. В зимнее время в результате охлаждения и, главным образом, ледообразования и ледонарастания здесь образуются значительные массы холодной и соленой воды, которые, когда они становятся тяжелее вод теплого глубинного слоя, должны сползать с материковой отмели по склону на дно океана. Эти воды, опускаясь, смешиваются с теплыми глубинными водами и образуют придонные антарктические воды.

На материковой отмели вся толща от поверхности до дна занята поверхностными антарктическими шельфовыми водами. Поверхностная циркуляция вод в круговороте моря Уэдделла отражает ветровое воздействие на поверхность моря. Поверхностные антарктические воды к северу от 60° ю.ш. перемещаются на восток-северо-восток к $15-30^{\circ}$ в.д. Поверхностное течение отклоняется к югу до $62-65^{\circ}$ ю.ш., а затем снова к востоку, уходя за пределы района. В связи с этим поворотом возникает ветвь течения, направленная на юго-запад в море Уэдделла. У гринвичского меридиана она смыкается с Западным прибрежным течением, и далее, по мере распределения в море Уэдделла, это хорошо выраженное течение в своем направлении повторяет очертания береговой линии, постепенно поворачивает к северу и замыкает циклоническую циркуляцию[3]. Придонная температура воды на восточном шельфе не обнаруживает значительных сезонных изменений, но колеблется между $-1,8^{\circ}$ и $0,5^{\circ}\text{C}$ из-за очень частого непредсказуемого вторжения «Теплой Глубоководной Воды» на шельф. В верхней части водного столба эти колебания менее выражены от $-1,8^{\circ}$ до $-1,2^{\circ}\text{C}$ антарктическим летом и относительно постоянной температуры приблизительно $-1,8^{\circ}\text{C}$ в остальное время года. Шельфовые воды обладают высокими соленостями $34,6-34,7\text{‰}$ и большим содержанием кислорода $7,3-8,0\text{ см}^3/\text{л}$. Грунты в море Уэдделла преимущественно мягкие с различными пропорциями ила, песка, гравия и валунов со сравнительно гетерогенным распределением. На восточном шельфе, особенно у м. Норвегия, на поверхности грунта заметен довольно толстый слой остатков эпифауны.

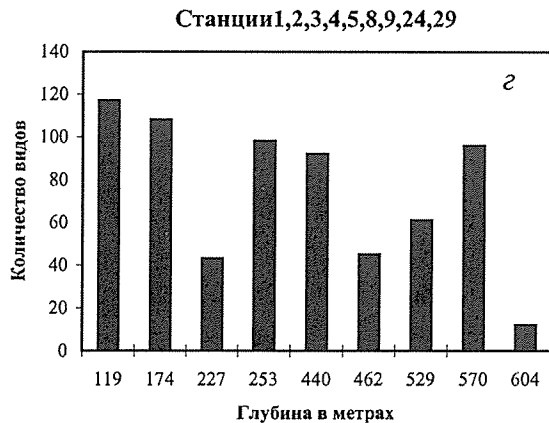
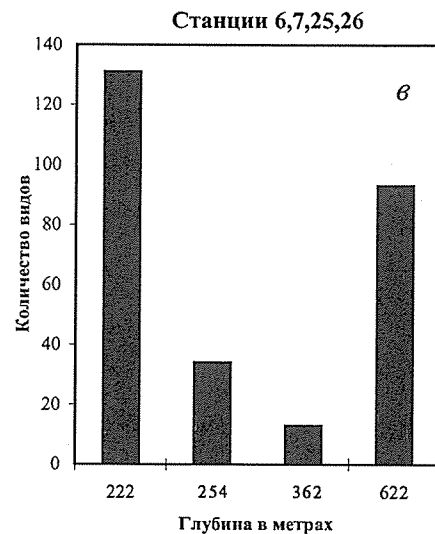
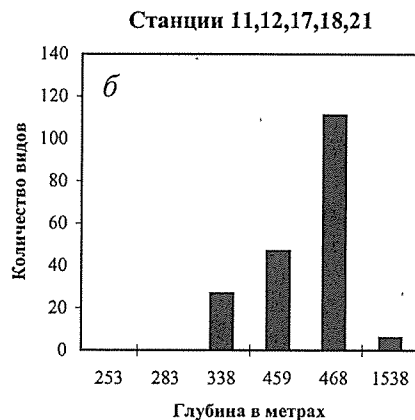
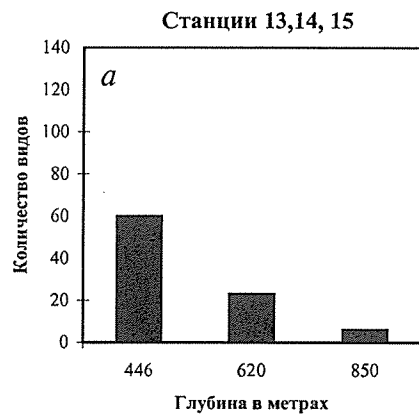


Рис. 2. Распределение видов мшанок по глубинам в районах с наибольшим количеством станций:
a, б — м. Весткапп, *в, г* — м. Норвегия

Район исследования, охватывающий восточную часть моря Уэдделла, исследователями [6] характеризовался как Восточное шельфовое сообщество у м. Норвегия и Южное шельфовое сообщество в Халли Бей.

Как можно видеть на карте (рис. 1) в районе между м. Весткап и Халли Бей все станции (за исключением 16-й) были сделаны на «наружном» склоне между шельфовым «подъемом» и большими глубинами. Во втором исследованном районе часть станций (6, 7, 26) была сделана в районе шельфового «подъема», другая — со стороны шельфового ледника (1, 5, 8, 4, 2, 24, 3, 32).

Распределение числа видов мшанок в зависимости от глубины в море Уэдделла в исследованных районах существенно отличается. Как можно видеть на рис. 2а,б,в,г в районах с наибольшим количеством станций (рис. 1) вертикальное распределение видов мшанок имеет сходство и некоторые различия. По крайней мере, на двух из них (рис. 2б,в) видно уменьшение количества встреченных видов в диапазоне глубин от 250 до 400 м, даже если принять во внимание неравномерность сборов. Следует подчеркнуть, что у шельфового ледника на переуглубленном антарктическом шельфе (рис. 2г) наблюдалось более равномерное распределение мшанок с небольшим снижением количества видов на 227 м и 462 м. Это находится в соответствии с описанным выше гидрологическим режимом шельфовых вод, где наблюдается равномерное от поверхности до дна состояние водных масс, но поскольку в этом районе шельф сравнительно узкий, он, вероятно, подвержен большему влиянию водных масс соседних с ним областей, а именно, шельфового склона (см. выше).

Сходное уменьшение количества видов на склоне обоих исследованных районов в диапазоне глубин 250—400 м может быть связано также до некоторой степени с небольшим количеством станций. Однако для сравнения можно привести данные для района м. Норвегия, где в диапазоне 100—200 м были сделаны 3 станции и обнаружено 166 видов, в диапазоне глубин 200—300 м были сделаны 6 станций и обнаружено 159 видов, а между 400 и 500 м на двух станциях встречено 114 видов. Поэтому относить снижение числа видов между 250 и 400 м в обоих районах только за счет ограниченного числа станций все же представляется неверным. Закономерно предположить, что оно определяется сменой водных масс, которая имеет место в круговороте моря Уэдделла. Дальнейшие исследования позволят получить более детальную картину распределения донной фауны мшанок, которая зависит от гидрологического режима моря Уэдделла.

Изменения в видовом составе в различных диапазонах глубин в двух исследованных районах моря Уэдделла были проанализированы с помощью степени сходства [9]:

$$j = c \times 100\% / (D_1 + D_2 - c)$$

и меры включения

$$i = c \times 100\% / D_{\min}$$

где c — число общих видов, встреченных в двух сравниваемых множествах, т.е. между двумя диапазонами глубин; D_1, D_2 — число видов в каждом из сравниваемых районов; $D_{\min}$ — диапазон глубин из двух сравниваемых с меньшим количеством встреченных видов. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Сходство и мера включения в процентах для фауны мшанок моря Уэдделла

	D_1	D_2	D_3	D_4	D_{5a}	D_{5b}	D_5	D_6	D_7
D_1	33	56	21,8	15,0	14,8	17,6	13,6	24,4	18,5
D_2	45,8	28	18,9	11,9	13,8	16,4	12,6	22,8	16,4
D_3	78,7	85,7	144	42,2	44,2	39,4	44,3	47,7	39,6
D_4	78,7	71,4	63,8	166	51,9	45,2	52,6	28,4	35,9
D_{5a}	72,7	78,5	63,2	71,2	153	49,4	—	100	45,1
D_{5b}	63,6	67,8	66,4	79,4	80,3	107	—	36,4	45,2
D_5	69,7	75	64,6	70,4	—	—	159	40,1	37,8
D_6	60,6	64,2	75,3	75,3	100	68,1	81,1	69	53,5
D_7	69,7	71,4	64,0	48,9	72,8	82,6	65,7	78,2	114

Примечание. Полужирный шрифт по диагонали — число встреченных видов в диапазоне глубин между Vestkapp и Halley, где соответственно диапазоны глубин: D_1 — 200–300 м, D_2 — 300–400 м, D_3 — 400–500 м; в районе Kapp Norwegia: D_4 — 100–200 м, D_5 — 200–300 м, D_{5a} — шельфовый подъем, D_{5b} — близ шельфового ледника, D_6 — 300–400 м, D_7 — 400–500 м.

Как можно видеть из таблицы, степень сходства между выделенными диапазонами глубин сравнительно невысокая и наибольшие ее значения наблюдаются между соседними по вертикали диапазонами глубин. Однако есть 2 исключения: очень низкой степенью сходства обладают диапазоны D_1 (псевдобатияль станция 16) и D_2 (на склоне) и соответственно низкими значениями меры включения, что может быть объяснено различиями в гидрологическом режиме, характерными для моря Уэдделла. Наоборот, сравнительно более высокой степенью сходства обладают диапазоны глубин D_3 (на склоне) и D_4 (станции 8, 24, 2, где край шельфа очень близко расположен к леднику), D_3 и D_5 , D_3 и D_6 (на склоне) и соответственно высокими значениями меры включения. Существенно также различается фауна между диапазонами глубин D_4 и D_7 (псевдобатияль). Вероятно, в последнем случае это свидетельствует о том, что там, где край шельфа очень

для моря Уэдделла, т.е. редких видов, которые часто возможно из-за своих очень маленьких колоний не были обнаружены.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке от подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан».

Поступила 27.11.2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов Н.Н., Данилов А.И., Клепиков А.В. Циркуляция и структура вод западной части моря Уэдделла по данным натурного эксперимента «Дрейфующая станция "Уэдделл-1"» // Антарктика. — М.: «Наука», 1998. — Вып. 34. — С. 5–30
2. Гонтарь В.И. Состав и распределение фауны мшанок моря Уэдделла, Антарктика // Мшанки Земного шара. Международный сборник научных статей. — Новокузнецк: Изд. Куз ГПА, 2003. — Т. 2. — С. 18–34.
3. Клепиков В.В. Гидрология моря Уэдделла. Гидрология прибрежных антарктических вод // Труды Советской Антарктической экспедиции. — 1963. — Т. 17. — С. 45–93
4. Andriashev A.P. Some additions to schemes of the vertical zonations of marine bottom fauna // Adaptations within Antarctic ecosystems. Houston: Gulf Publishing Company, Llano G.A. (ed.), 1977. — P. 351–360.
5. Arnaud P.M. and Hain S. Quantitative distribution of the shelf and slope molluscan fauna (Gastropoda, Bivalvia) of the Eastern Weddell Sea (Antarctica) // Polar Biology. — 1992. — Vol. 12. — № 1. — P. 103–110.
6. Gerdes D., Klages M., Arntz W.E., Herman R.L., Gleron J., Hain S. Quantitative investigation on macrobenthos communities of the southeastern Weddell Sea shelf based on multibox corer samples // Polar Biology. — 1992. — Vol. 12. — № 2. — P. 291–302.
7. Gontar V. I. New species and new genera of Cheilostomata from the Weddell Sea, Antarctica (Bryozoa) // Zoosystematica Rossica. — 2002. — № 10 (2). — P. 285–292.
8. Gontar V.I., Zabala M. Bryozoa. In: Gutt J., Sirenko B.I., Arntz W.E., Smirnov I.S., Claude de Broyer (ed). Biodiversity of the Weddell Sea: macrozoobenthic species (demersal fish included) sampled during the expedition ANT XII/3 (EASIZ I) with RV «Polarstern» // Reports on Polar Research. — 2000. — № 372. — P. 27–40.
9. Jaccard P. Distribution de la flore alpine dans le Bassin de Drouces et dans quelques régions voisines // Bulletin de la Société Vandoise Sciences Naturelles. — 1901. — Vol. 37 (140). — P. 241–272.
10. Hayward P.J. Antarctic Cheilostomatous Bryozoa. — Oxford, New York, Tokyo : Oxford University Press, 1995. — 355 p.

ФАУНА МОРЯ УЭДДЕЛЛА И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

Фауна самого большого моря Антарктики — моря Уэдделла до недавнего времени оставалась слабо изученной, вследствие его труднодоступности. В 80-х годах, благодаря усилиям в основном германских коллег, были начаты регулярные исследования фауны этого моря и, уже к 1988 г., была опубликована первая сводка о видовом составе, содержащая более 400 видов [22]. Работы по изучению биоразнообразия этого моря в 1990-х годах были продолжены. Массовые сборы материалов, осуществленные в ходе рейса немецкого ледокола «Полярштерн» в 1996 г. и их тщательная обработка, проведенная в основном зоологами Санкт-Петербурга, Москвы, Севастополя и Харькова вместе со сведениями по отдельным группам, полученным нашими зарубежными коллегами, позволила утроить первые сведения [9]. Сейчас нам известно около 1500 видов беспозвоночных, населяющих море Уэдделла (табл. 1).

Современная техника в виде подводной телекамеры, управляемой с борта ледокола «Полярштерн» показала распределение животных на дне моря. Большая часть дна на огромных площадях довольно густо заселена разноразмерными животными и скорее напоминает цветущий луг (рис. 1, 2). Здесь доминируют по биомассе сидячие животные, среди которых крупные губки, колонии ветвистых мшанок, асцидии, горгонарии, гидроидные полипы, актинии, птеробранхии и многие другие. Среди сидячих животных находится немало подвижных гидробионтов (офиур, голотурий, морских лилий и др.), часть которых забирается на самые высокие колонии губок, горгонарий, птеробранхий.

Все население дна и сидячее, и бродячее тянется вверх к основной пище — сестону (планктонным организмам и детриту), проносящемуся с течением над богатыми бентосными поселениями. По оценкам биологов [5, 1, 13], средняя биомасса бентоса в море Уэдделла и прилежащих с востока акваторий не менее 450–500 г/м², что превышает таковую даже во многих других высокопродуктивных районах Мирового океана. В чем причина такого обилия жизни в таких достаточно суровых условиях, какие

Таблица 1.

Видовой состав беспозвоночных моря Уэдделла*

Группа	Число видов	Группа	Число видов
<i>Foraminifera</i>	74	<i>Mysidacea</i>	32
<i>Porifera</i>	159	<i>Gammaridae</i>	116
<i>Hydrozoa</i>	41	<i>Caprellidea</i>	4
<i>Scyphozoa</i>	2	<i>Cumacea</i>	29
<i>Anthozoa</i>	48	<i>Tanaidacea</i>	1
<i>Plathelminthes</i>	1	<i>Isopoda</i>	68
<i>Nemertini</i>	10	<i>Ostracoda</i>	1
<i>Nemathelminthes</i>	1	<i>Polyplacophora</i>	4
<i>Cephalorhyncha</i>	2	<i>Aplacophora</i>	4
<i>Polychaeta</i>	60	<i>Gastropoda</i>	205
<i>Oligochaeta</i>	1	<i>Bivalvia</i>	64
<i>Hirudinea</i>	2	<i>Scaphopoda</i>	3
<i>Echiura</i>	2	<i>Cephalopoda</i>	12
<i>Sipuncula</i>	9	<i>Brachiopoda</i>	7
<i>Tardigrada</i>	1	<i>Bryozoa</i>	184
<i>Pycnogonida</i>	85	<i>Holothurioidea</i>	34
<i>Acari</i>	1	<i>Echinoidea</i>	19
<i>Calanoida</i>	6	<i>Asteroidea</i>	50
<i>Harpacticoida</i>	14	<i>Ophiuroidea</i>	56
<i>Cirripedia</i>	1	<i>Crinoidea</i>	5
<i>Leptostraca</i>	1	<i>Hemichordata</i>	5
<i>Euphausiacea</i>	5	<i>Ascidacea</i>	51
<i>Natantia</i>	5	Всего	1495

Примечание. * — составлен по литературным данным и по предварительным данным полевых исследований

характерны для шельфовой Антарктики: температура воды $-1,8^{\circ}\text{C}$, большая часть моря круглый год покрыта льдом, а меньшая освобождается ото льда лишь на короткое время антарктического лета; продолжительный зимний период без солнечного света и поэтому без продуцирования фитопланктона — основного источника пищи и зоопланктона, и зообентоса.

Здесь уместно вспомнить одну интересную особенность моря Уэдделла. Оно входит в систему круговорота Уэдделла. По данным В.В.Клепикова [3] и других океанологов [11, 2], это крупномасштабная циклоническая циркуляционная система, расположенная южнее Полярной фронтальной зоны от Антарктического п-ова до $20-40^{\circ}$ в.д. Северная граница круговорота Уэдделла является северной границей течения из моря Уэдделла (рис. 3).

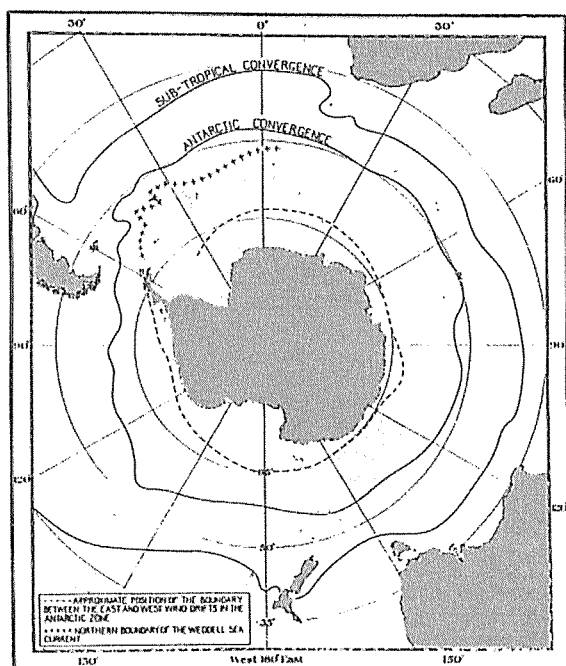


Рис. 3. Распространение северной границы течения моря Уэдделла по [10]

Богатые биогенами (солями фосфора, азота и кремния) холодные воды из юго-западной части моря Уэдделла (Уэдделломорский дрейф) распространяются на север, где сталкиваясь с водами пролива Дрейка, заворачивают на восток. В весенне-летний период здесь наблюдается бурное продуцирование водорослей, которыми откармливается весь зоопланктон. Вместе с холодными водами Уэдделломорского дрейфа в северную часть круговорота Уэдделла, по-видимому, выносятся и выжившие в этом море в зимний период планктонные организмы, в том числе криль. На карте распространения кривля (рис. 4) [15] хорошо видно увеличение его плотности сразу на северо-восток от северной оконечности Антарктического полуострова. Если учесть, что кривль живет 3–4, а по некоторым сведениям и до 6 и более лет [4], то становится понятным, что некоторые особи эуфаузиид могут проходить весь круговорот Уэдделла не один раз. Продвигаясь на восток по северной части круговорота воды, обогащенные фитопланктоном и зоопланктоном, в конце концов заворачивают сначала на юг к Антарктиде, а затем на запад, возвращаясь в море Уэдделла.

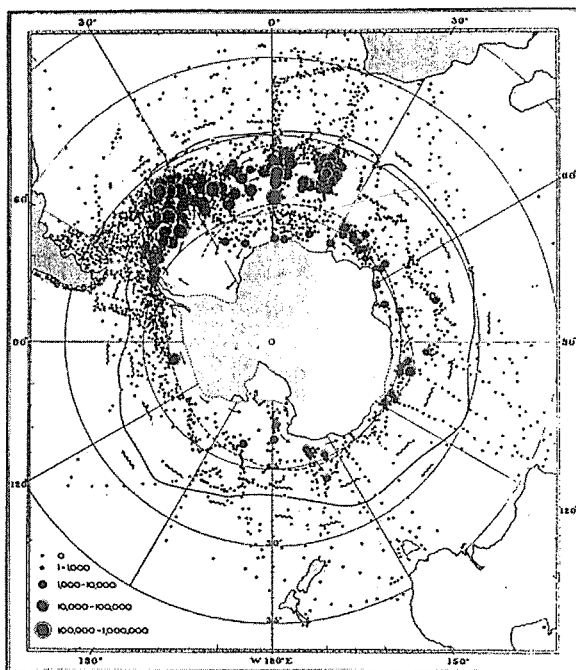


Рис. 4. Распространение криля в Южном океане [15].

Здесь воды богатые живым и отмершим фитопланктоном и зоопланктоном, а также фекалиями проносятся над густыми зарослями сестонофагов, которые как гигантское сито улавливают все съедобное из придонной толщи воды, включая фитопланктон, микро- и мезозоопланктон и даже макропланктон в виде мизид, а также отмерший фитопланктон, трупы и фекалии зоопланктона. О питании копеподами и эуфаузидами таких донных животных как звезды и офиуры известно давно [12]. По-видимому, основу пищи этих и многих других бентосных животных составляют трупы погибших рачков, опустившиеся на дно. О потоке трупов эуфаузиид на дно и о его роли в питании бентоса свидетельствуют исследования М.Н.Соколовой, [6], В.Б.Цейтлина и Н.М.Вороной [7]. По данным последних авторов в районах доминирования криля поток мертвого криля на дно должен рассматриваться как основной источник питания донной фауны даже там, где нет промысла, приводящего к его повышенной смертности. Гигантские запасы криля в системе круговорота Уэдделла свидетельствуют в пользу того, что эуфаузиды как источник питания играют в море Уэдделла существенную роль.

В экосистеме круговорота Уэдделла должно быть значительное уменьшение зимнего неактивного периода, характерного для полярных морей. Это обусловлено, возможно, тем, что через море Уэдделла непрерывно, независимо от сезонов года прокачивается вода, идущая с севера. Эти водные массы почти постоянно несут огромные запасы сестона (живой и мертвый фито- и зоопланктон и их фекалии) из низкоширотных районов, где фотосинтетическая активность водорослей происходит в течение значительно более продолжительного периода времени, чем в высокоширотных районах, закрытых большую часть года, если не постоянно, ледяным покрывалом. Благодаря этому непрерывному потоку донные сообщества моря Уэдделла получают большую часть года богатую пищу, что позволяет бентосу этого моря поддерживать столь высокую плотность поселения и высокую биомассу. В отличие от антарктических экосистем, арктические экосистемы на шельфе испытывают существенные перебои в снабжении пищей в течение долгой зимы, когда лед покрывает почти всю поверхность океана и практически отсутствует солнечный свет, единственный источник энергии фотосинтеза.

Другой интересной особенностью моря Уэдделла оказывается необычно богатый видовой состав и нарушение правила Уоллеса, согласно которому видовое разнообразие повышается от полюсов к экватору. Сравнение высокоширотной фауны моря Уэдделла с фауной соседнего с ним Магелланова района, расположенного ближе к экватору, обнаруживает нарушение этого правила для некоторых групп морских донных животных. В ряде групп — актинии, кумовые раки и мшанки (*Actiniaria*, *Cumacea*, *Bryozoa*) видовое разнообразие в море Уэдделла почти не уступает таковому в Магеллановом районе, а в других — губки, морские пауки, голотурии, морские звезды, ежи и офиуры (*Porifera*, *Pantopoda*, *Holothuroidea*, *Asteroidea*, *Echinoidea*, *Ophiuroidea*) даже выше, вопреки правилу Уоллеса. Причем число видов губок, морских пауков, звезд и офиур в море Уэдделла в 2 с лишним раза превышает таковое в Магеллановом районе (табл. 2).

Большое разнообразие фауны обычно зависит от количества экологических ниш, которые, в свою очередь, зависят от разнообразия фаций. В Магеллановом районе наблюдается довольно высокое разнообразие фаций, в то время как в море Уэдделла, наоборот, — однообразие фаций (однообразие грунтов, отсутствие проливов, островов и т.п.). Почему же здесь разнообразие некоторых групп и соответственно экологических ниш выше чем в Магеллановом районе? Ответ на этот вопрос следует искать, по всей вероятности, в формировании донных сообществ обрастателей, в структуре их поселений и в биоценологических отношениях. Основу фауны моря Уэдделла на шельфе составляют крупные губки, ветвистые мшанки,

Таблица 2.

**Видовое разнообразие некоторых групп беспозвоночных
из антарктических шельфовых вод,
моря Уэдделла и Магелланова района**

Группа	Антарктические воды	Море Уэдделла	Магелланов район	Источник
<i>Porifera</i>	350 ¹	159 ¹	44 ^{2*}	¹ Bartel et al., 1997 ² Pansini, Sara, 1999
<i>Hydrozoa</i>	104 ¹	41 ²	126 ¹	¹ Canterro, Carascosa, 1999 ² Stepanjants, Sloboda, 2000 с добавлением
<i>Actiniaria</i>	—	16	14	Grebelyni. 2000 с добавлением
<i>Polychaeta</i>	650+ ¹	60 ²	223 ¹	¹ Knox, Lowry, 1977 ² Gamby, в экспедиции, 1996
<i>Sipuncula</i>	—	9	16	Saiz-Salinas, Pagola-Carte, 1999
<i>Pyrgononida</i>	200	85	46	Турпаева, в письме, 2002
<i>Decapoda (Replantia)</i>	—	0	30	Arntz et al., 1999
<i>Decapoda (Natantia)</i>	—	5	11	Arntz, Gorny, 1996
<i>Mysidacea</i>	37 ²	32 ³	31 ¹	¹ Brandt et al., 1998 ² Brandt, 1999 ³ Wittmann, 1991
<i>Gammaridea</i>	470 ¹	116 ²	206 ¹	¹ De Broyer, Rauschert, 1999 ² Rauschert, De Broyer, 2000
<i>Cumacea</i>	52	29	31	Mühlenhardt-Siegel, 1999
<i>Isopoda</i>	348 ¹	68 ²	101 ²	¹ Brandt et al., 1998 ² Brandt, 1999
<i>Polyplacophora</i>	13	4	15	Сиренко
<i>Gastropoda</i>	—	205 ²	210 ¹	¹ Linse, 2001 ² Egorova, 2000, с добавлением
<i>Bivalvia</i>	—	64 ²	131 ¹	¹ Linse, 2001 ² Egorova, 2000, с добавлением
<i>Bryozoa</i>	310 ¹	184 ²	205 ³	¹ Bullivant, 1969 ² Gontar, 2000 с добавлением ³ Moyano, 1999
<i>Holothuroidea</i>	—	34 ¹	27 ²	¹ Gutt, 1988 ² Deichmann, 1947
<i>Echinoidea</i>	—	4 ²	7 ¹	² Миронов, в письме, 2003
<i>Asteroida</i>	—	50 ²	21 ¹	¹ Larrain al., 1999 ² Смирнов А.
<i>Ophiuroidea</i>	—	56	26	Смирнов И.
<i>Ascidacea</i>	129 ¹	51 ²	35 ¹	¹ Kott. 1969, 1971 ² Romanov, 2000 с добавлением

Примечание. * — только *Demospongiae* которые составляют около 80 % от всех видов губок региона

крупные колониальные и одиночные асцидии, колонии птеробранхий, различные кишечнотолостные, прикрепляющиеся к грубообломочному материалу и друг к другу. Они часто выступают в роли видов эдификаторов. Вся эта масса обрастателей стремится вытянуться вверх насколько это возможно, ближе к сестону (взвешенному в воде органическому веществу) — основному источнику пищи, который разносится течениями. Самыми высокими оказываются губки, горгонарии, некоторые асцидии, остальные сидячие сестонофаги занимают места пониже, нередко прикрепляясь на более высоких гидробионтах. В результате образуются поселения, состоящие из нескольких ярусов, в каждом из которых условия для прикрепления и питания различаются. Часть подвижных организмов (офиуры, лилии, голотурии и др.) забирается по возможности в самый верхний ярус. По-видимому, ярусное распределение сидячих организмов компенсирует недостаток разнообразия фаций в море Уэдделла и увеличивает число экологических ниш, или, точнее, лицензий. А это, в свою очередь, способствует увеличению видового разнообразия, даже по сравнению с таким относительно тепловодным регионом как Магелланов район. Обилие губок, мшанок, асцидий и других сидячих организмов явилось причиной большого разнообразия фауны хищников, питающихся этими сессильными животными и большого числа симбионтов, живущих на них. Уже сейчас известны десятки симбиотических пар в антарктической фауне. Среди них гастропода *Harpovoluta charkoti* и актиния *Isosicyonis alba* [8]; гастроподы *Dickdellia labioflexa* и морской паук *Nimphon isabellae* [17]; гастропода *Capulus subcompressus* и полихета *Serpula narconensis* [16, 18]; офиура *Ophiurolepis brevissima* и губка *Iophon radiatus* [19]; офиура *Theodorina relegata* и гидроидный полип *Hydractinia vallini* [20] и многие другие (рис. 5). Большое число симбиотических пар в антарктической фауне свидетельствует о длительном пути ее развития в течение нескольких десятков миллионов лет [21].

Несмотря на то, что все антарктические моря имеют протяженные границы с соседними океанами и поэтому они считаются открытыми морями, море Уэдделла вследствие круговой циркуляции воды может рассматриваться как полузакрытое, а вся экосистема круговорота Уэдделла является полузакрытой. Богатые сообщества шельфа моря Уэдделла и окружающих акваторий, входящих в систему круговорота Уэдделла, служат своего рода аккумулятором, накапливающим в течение многих веков органику и биогены в биомассе бентоса и снабжающим ими планктонные сообщества, в том числе самые крупные в Антарктике скопления криля.

В результате устойчивой системы круговорота органическое вещество, развившееся на его северных границах в виде обильного фитопланктона,

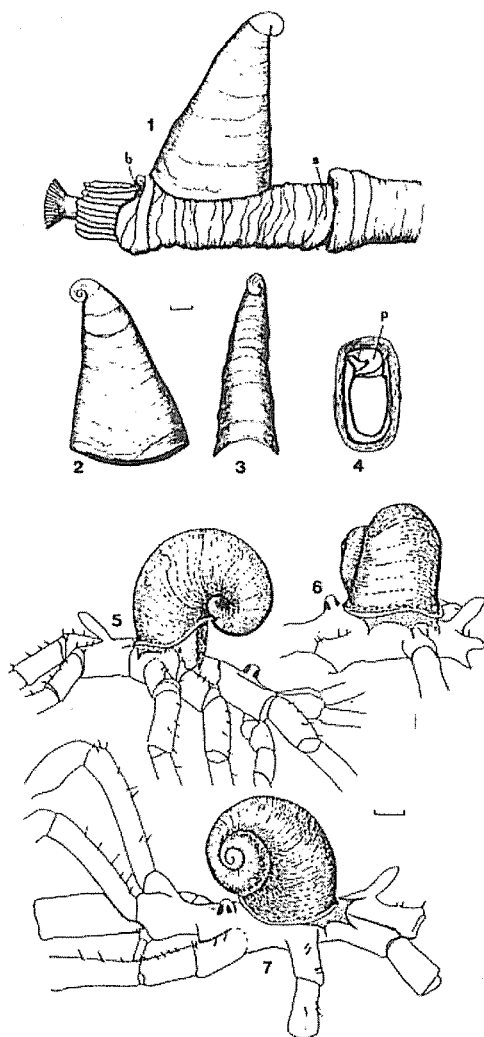


Рис. 5. Некоторые симбионты моря Уэдделла.

1 — брюхоногий моллюск *Capulus subcompressus*, сидящий на известковой трубке полихеты *Serpula narconensis*; 2, 3 — раковина *C. subcompressus* (вид сбоку и сзади); 4 — *C. subcompressus*, (вид снизу): *s* — место первоначального поселения моллюска на трубку, *b* — выемка в трубке, выскобленная брюхоногим моллюском, облегчающая проникновение к жабрам полихеты, улавливающим пищу, *p* — псевдохоботок, с помощью которого моллюск забирает часть пищи у полихеты; 5, 6, 7 — брюхоногий моллюск *Dickdelia labioflexa*, сидящий на морском пауке, в покровах которого моллюск проделывает отверстие и забирает часть пищи из желудка паука. Масштабная линейка 1 мм.

и выросшего на нем зоопланктона, а также их мертвых остатков и фекальных масс, затем снова попадает в море Уэдделла, где большая их часть потребляется богатым бентосом.

В морских экосистемах постоянно действуют два весьма важных процесса. Первый из них связан с возвратом синтезированной органики в биологический оборот в виде пищи и последующей деструкции ее до биогенов. Второй процесс связан с изъятием части органики из оборота в результате захоронения ее в донных осадках. В системе круговорота Уэдделла первый процесс явно доминирует над вторым, что приводит с одной стороны к развитию высокопродуктивных сообществ планктона и бентоса и, с другой стороны, к весьма слабому заилению грунта. Вторым фактором, в свою очередь, позволяет сохраняться неизменными огромные пространства шельфа, покрытого большим количеством грубообломочного материала, являющегося прекрасным субстратом для богатой сессильной фауны сестонофагов, доминирующей в море Уэдделла. В противоположность этому в Арктике доминирует второй процесс, в результате которого большое количество органики и биогенов поступающее с окружающей Арктический океан суши быстро захоранивается в многометровых толщах самого шельфа и в глубоководных бассейнах. Последнее, по-видимому, объясняет довольно низкую биологическую продуктивность Арктических морей и перспективность разработок углеводородных месторождений на шельфах Арктических морей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке от подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан».

Поступила 24.11.2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Г.М. Некоторые черты в количественном распространении донной фауны в Антарктике // Информационный бюллетень Советской Антарктической Экспедиции. — 1964. — Т. 1. — С. 119—121.
2. Данилов А.И., Гурецкий В.В. Крупномасштабная структура круговорота Уэдделла // Пелагические экосистемы Южного океана. — М.: Наука, 1993. — С. 19—39.
3. Клепиков В.В. Гидрология моря Уэдделла // Труды САЭ. — 1963. — Т. 17. — С. 45—93.
4. Макаров Р.Р., Спиридонов В.А. Жизненный цикл и распределение антарктического криля: некоторые итоги исследований и проблематика // Пелагические экосистемы Южного океана. — М.: Наука, 1993. — С. 158—168.
5. Пастернак Ф.А., Гусев А.В. Бентонические исследования // Вторая морская экспедиция на д/э «Обь» 1956—1957 гг. — 1960. — С. 127—143.
6. Соколова М.Н. О значении эвфаузид в питании глубоководного макробентоса // Питание морских беспозвоночных в разных вертикальных и широтных зонах. — М.: — 1993. — С. 23—31.

7. Цейтлин В.Б., Воронина Н.М. Промысел криля и поток органического вещества из поверхностной зоны океана в Антарктике // Океанология. — 1996. — Т. 36, №6. — С. 888—891.
8. Arnaud P.M. Observations ecologiques et biologiques sur la Volutidae antarctique *Harpovoluta charcoti* (Lamy, 1910) (Gastropoda, Prosobranchia). *Haliotis*, 7. — 1978. — С. 4—46.
9. Biodiversity of the Weddell Sea: macrozoobenthic species (demersal fish included) sampled during the expedition ANT XIII/3 (EASIZ) with RV «Polarstern», 2000 // *Berichte zur Polarforschung*. — 2000. — № 372. — 145 p.
10. Deacon, G.E.R. The Southern Ocean: History of Exploratin // Adaptations within Antarctic Ecosystems: Proceedings of the Third SCAR Symposium on Antarctic Biology. — 1977. — P. XV—XXXVII.
11. Deacon G.E.R. The Weddell gyre. *Deep-Sea Res. A*. — 1979. — Vol. 26, № 9. — P. 981—986.
12. Dearborn, J.H. Foods and feeding characteristics of Antarctic asteroids and ophiuroids // Adaptations within Antarctic ecosystems, Proceedings of the Third SCAR Symposium on Antarctic biology. — 1977. — P. 293—326.
13. Gerdes D., M.Klages, W.E.Arntz, R.L.Herman, J.Galeron and S.Hain. Quantitative investigations on macrobenthos communities of the southeastern Weddell Sea shelf based on multibox corer samples // *Polar Biology*, 1992. — Vol.12. — P. 291—301.
14. Gutt J. On the distribution and ecology of holothurian on the Weddell Sea shelf (Antarctica) // *Polar Biology*, 1991. — Vol.11. — P. 145—155.
15. Marr J.W.C. The natural history and geography of Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) // *Discovery Rep.*, 1962. — Vol. 32. — P. 33—464.
16. Sciaparelli S., Cattaneo-Vietti R., Chiantore M. Adaptive morphology of *Capulus subcompressus* Pelseneer, 1903 (Gastropoda, Capulidae) from Terra Nova Bay, the Ross Sea (Antarctica) // *Polar Biology*, 2000. — Vol. 23. — P. 11—16.
17. Sirenko B.I. Symbiosis of Antarctic Gastropod and Pantopod // *Ruthenica*, 2001, — Vol.10(2). — P. 159—162.
18. Sirenko B.I., Schrödl M. Molluscs biodiversity and ecology // *Berichte zur Polarforschung*, 2001. — № 402. — P. 85—95.
19. Smirnov, I.S., Koltun V.M. Symbiosis of the antarctic sponge genus *Iophon* (Porifera) and the ophiuroid genus *Ophiurolepis* (Ophiuroidea, Echinodermata) // *Modern Problems of Poriferan Biology*. Proceedings of the first All-Russia meeting spongiologists, St.Petersburg, February 1996. *Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe E, Band 20*. — 1997. — P. 133—134.
20. Smirnov I.S., Stepanjants S.D. The symbiosis of hydroid *Hydractinia vallini* Jaderholm and brittle-star of family *Ophiolepididae* in Antarctic waters // *Theoretical and practical significance of Coelenterata*. — 1980. — P. 105—108.
21. Smirnov I., Stepanjants S., Koltun V., Svoboda A. Polar ophiuroids and their symbiotic relations // *Proceedings of the Ninth International Echinoderm Conference*. San Francisco, USA. 5—9 August, 1996. — 1998. — P. 423.
22. Voss J. Zoogeography and Community Analysis of Macrobenthos of the Weddell Sea (Antarctica) // *Berichte zur Polarforschung*. — 1988. — № 45. — P. 145.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЗМУЩЕННОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ПОВЕДЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АНТАРКТИЧЕСКОМ ЛЕДНИКОВОМ КУПОЛЕ

1. ВВЕДЕНИЕ

Потоки галактических космических лучей, изменяемые солнечным ветром, и всплески солнечных космических лучей рассматриваются обычно как единственно возможный канал воздействия солнечной активности на земную атмосферу [9–12, 15, 16, 17]. Однако, детальный анализ данных антарктической околополюсной станции Восток [18] позволил сделать вывод, что драматические изменения тропосферной температуры, наблюдаемые в околополюсной области, связаны, прежде всего, с вариациями межпланетного магнитного поля (ММП) и вызываются соответствующими флуктуациями межпланетного электрического поля ($E_{sw} = -V \times B$). Если вертикальная компонента ММП уменьшается ($\Delta B_z < 0$), наблюдается потепление в приземном слое и похолодание на высотах $h > 10$ км. При $\Delta B_z > 0$ наблюдаются противоположные температурные изменения (похолодание — в приземном слое и потепление — на $h > 10$ км). Имеет место линейная связь между величиной изменений межпланетного электрического поля ΔE_{sw} и вариациями температуры на ст. Восток: чем больше скачек в E_{sw} , тем сильнее изменение температуры. Эффект достигает максимума в пределах одного дня и исчезает столь же быстро. Флуктуации E_{sw} влияют также на атмосферное давление и ветер.

Результаты [18] были получены на основании двух серий наблюдений на ст. Восток: метеорологических измерений (температура, давление, ветер) в приземном слое ($h = 3,45$ км) за 1978–1992 гг. и аэрологических измерений тех же параметров на $h = 3,5 - 20$ км. Поскольку подобного рода эффекты никогда не обнаруживались ранее, было предположено, что отклик атмосферы на вариации электрического поля ограничен областью вокруг южного геомагнитного полюса и быстро исчезает при удалении от полюса. Чтобы оценить действительную область, подверженную влиянию

межпланетного электрического поля, были рассмотрены, помимо ст. Восток ($\varphi = 78^{\circ}27'$ ю.ш., $\lambda = 106^{\circ}52'$ в.д.), метеорологические данные других станций, действующих на Антарктическом ледовом куполе: Южный Полюс ($\varphi = 90^{\circ}$ с.ш., $\lambda = 0^{\circ}0'$ в.д.) и Купол С ($\varphi = 75,1^{\circ}$ ю.ш., $\lambda = 123,4^{\circ}$ в.д.). Анализ этих данных является темой данной публикации.

2. ДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В АНАЛИЗЕ

Измерения температуры проводились автоматическим погодным комплексом (AWS) на станциях Купол С и Южный Полюс и автоматическим метеорологическим комплексом MILOS на ст. Восток. По этим измерениям были рассчитаны среднечасовые значения температурных отклонений (ΔT) для зимних сезонов 2000/01 г. Часовые характеристики параметров солнечного ветра (скорость V , плотность N , межпланетное магнитное поле B_z) были взяты для тех же периодов и на их основании были рассчитаны соответствующие величины давления солнечного ветра ($P_{sw} = NV^2$) и межпланетного электрического поля ($E_{sw} = V \times B$). Время максимального отклонения соответствующего параметра солнечного ветра определялось как ключевой момент (*key date*). Вариации температуры ΔT рассчитывались как разница в значениях температуры в ключевой момент T_0 для 24 предшествующих и 72 последующих часов. Эти температурные отклонения сопоставлялись с ходом соответствующих параметров E_{sw} и P_{sw} с использованием метода наложенных эпох.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Рассмотрим ход температурных изменений в приземном слое на станциях Восток, Купол С и Южный Полюс. Рис. 1 показывает, в качестве примера, поведение температуры на этих станциях в течение 40 дней 2000 г. Можно видеть, что наземная температура флуктуирует скорее произвольно на каждой станции. Тем не менее, имеется определенное соответствие и временами даже синхронность в температурных изменениях на станциях Восток и Купол С, тогда как температура на ст. Южный Полюс варьирует в противофазе с изменениями температуры на этих двух станциях. Специфический отклик температуры на изменения солнечного ветра подтверждает эту тенденцию.

Рис. 2 дает три примера изменения температуры в приземном слое на ст. Восток после больших отрицательных изменений ММП ($\Delta B_z < -4$ нТ): 1 июня 2000 г., 27 мая и 22 сентября 2001 г. (к сожалению, событий с большими и стабильными положительными отклонениями B_z в период 2000/01 г. обнаружить не удалось). Поведение динамического давления в ходе этих же событий также показано на рис. 2. Время регистрации экстремального электрического поля было взято в качестве ключевого момента в каж-

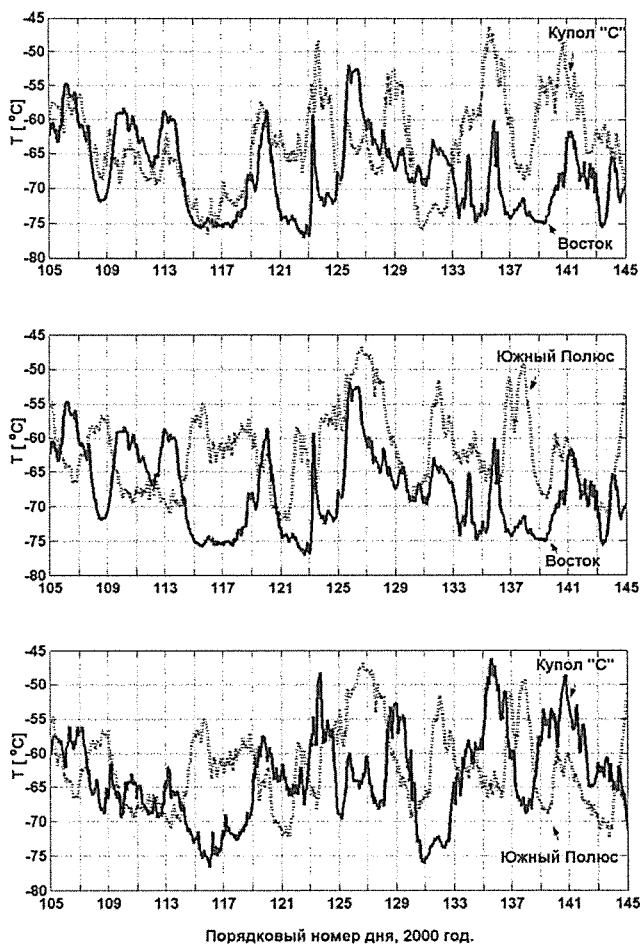


Рис. 1. Ход температуры на станциях Восток, Купол С и Южный полюс в апреле-мае 2000 г.

дом случае, а величина температуры, фиксируемой в ключевой момент, была взята за нулевой уровень. На рис. 2 представлены отклонения температуры от нулевого уровня в предшествующие 24 часа и последующие 48 часов. Можно видеть очевидную тенденцию к увеличению наземной температуры после отрицательных изменений B_z ММП (что соответствует увеличению межпланетного электрического поля утро-вечер), при этом эффекты динамического давления солнечного ветра не очевидны.

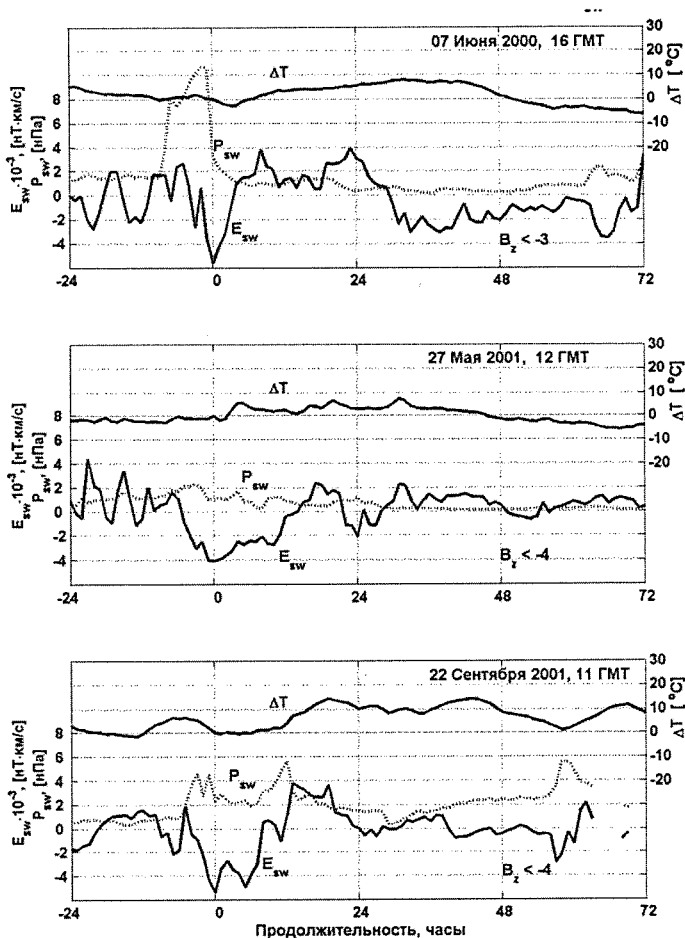


Рис. 2. Примеры очевидных отклонений приземной температуры ΔT на станции Восток после больших торсионных изменений межпланетного электрического поля E_{sw} ($IMF \Delta B_z < -4nT$)

Рис. 3 показывает изменения наземной температуры ΔT на ст. Восток, полученные методом наложения эпох, в связи с вариациями E_{sw} . Верхний ряд включает события ($n=20$), когда число часовых интервалов $\Delta B_z < -3nT$ вблизи ключевого момента было больше 3. Средний ряд дает ту же зависимость для всех событий в 2000/01 г. с числом таких часовых интервалов свыше 6 ($n=14$), и в нижнем ряду учтены события ($n=4$), когда усло-

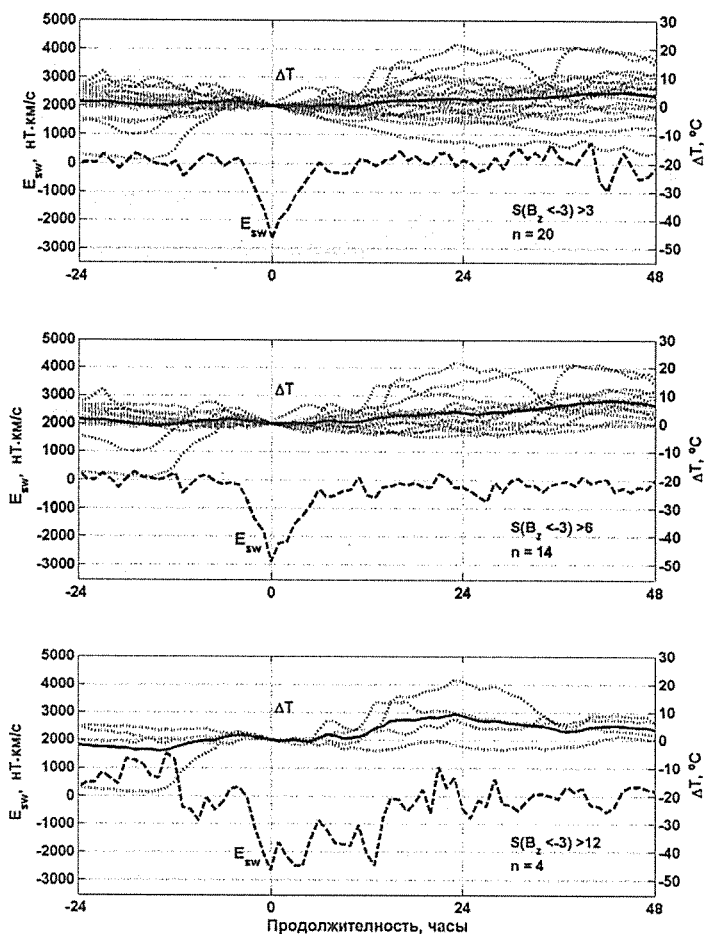


Рис. 3. Изменения наземной температуры ΔT на ст. Восток в связи с вариациями E_{SW} за период 2000/01 г. (время максимальной отрицательной величины B_z выбрано за ключевой момент)

вие $\Delta B_z < -3nT$ выполнялось в течение 12 или более часов. Как можно видеть, величина температурных изменений определяется мощностью воздействия электрического поля: чем дольше период воздействия и чем выше интенсивность электрического поля, тем больше температурная вариация и тем короче задержка между нулевым часом и временем начала температурных изменений. Возможно, что на величину временной задержки влияет

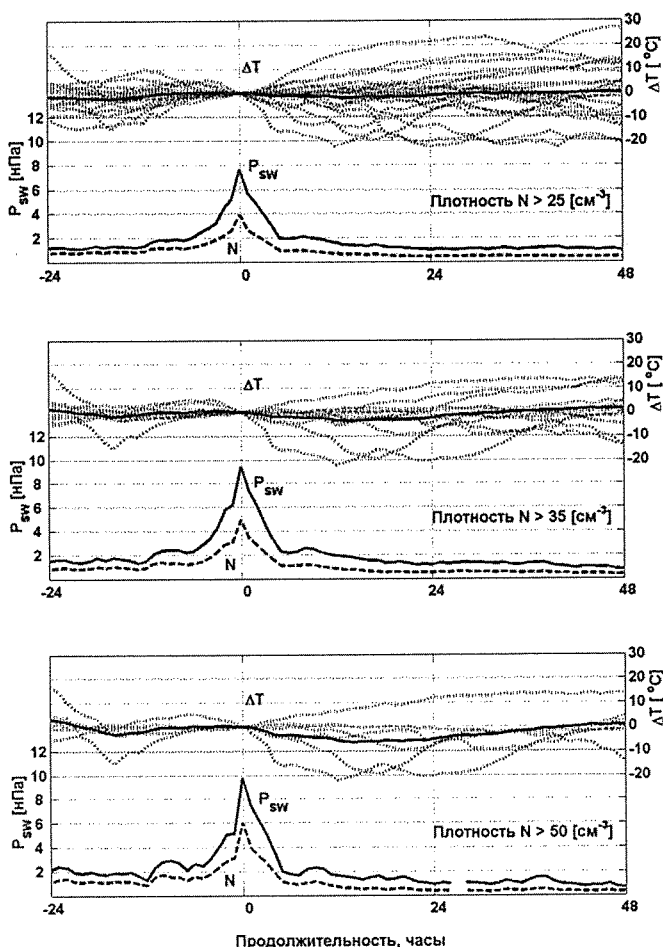


Рис. 4. Изменения наземной температуры ΔT на ст. Восток в связи с импульсами динамического давления солнечного ветра в 2000/01 г. (время резкого скачка в давлении солнечного ветра выбрано за ключевой момент)

также и динамическое давление солнечного ветра. Рис. 4 показывает поведение ΔT на ст. Восток в связи с резкими скачками в плотности N солнечного ветра (пунктир) и, соответственно, в динамическом давлении P_{sw} (сплошная линия). В этом случае ключевой момент был определен как время резкого увеличения динамического давления солнечного ветра, которое практически совпадает с временем скачка в плотности солнечного ветра. Как

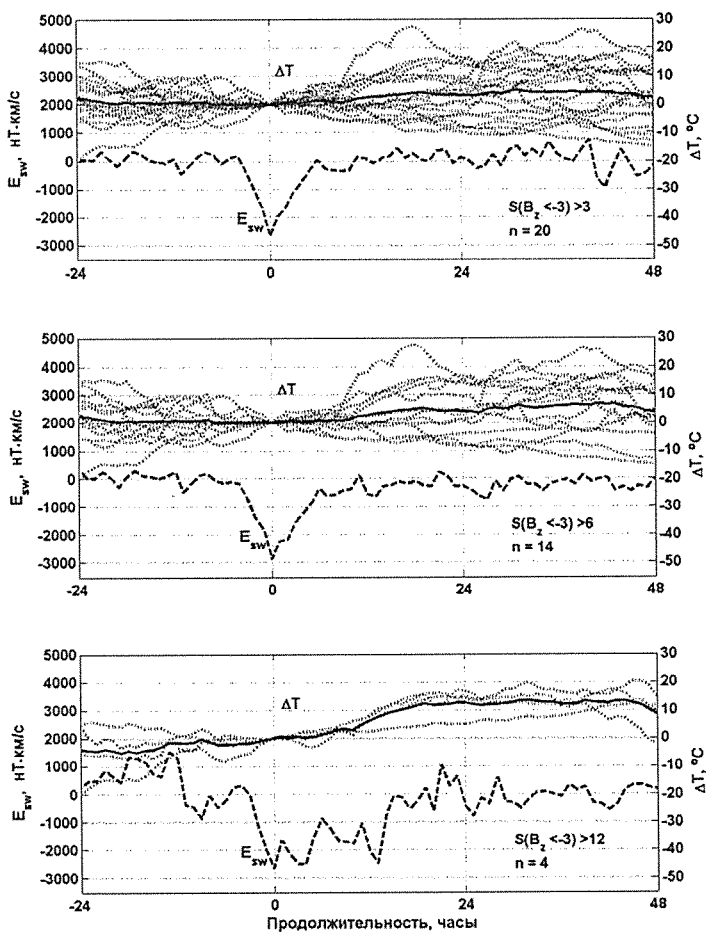


Рис. 5. Изменения наземной температуры ΔT на ст. Купол С в связи с вариациями E_{SW} за период 2000/01 г.

видно из рис. 4, имеется четкая тенденция к уменьшению температуры в приземном слое на ст. Восток после импульсов динамического давления: похолодание начинается примерно через 2 часа после импульса P_{SW} и продолжается около суток. Чем больше импульс давления, тем больше похолодание в приземном слое. Скачки в динамическом давлении, происходящие на фронте ударной волны, формируемой при движении корональных выбросов массы из Солнца (СМЕ), обычно опережают критические измене-

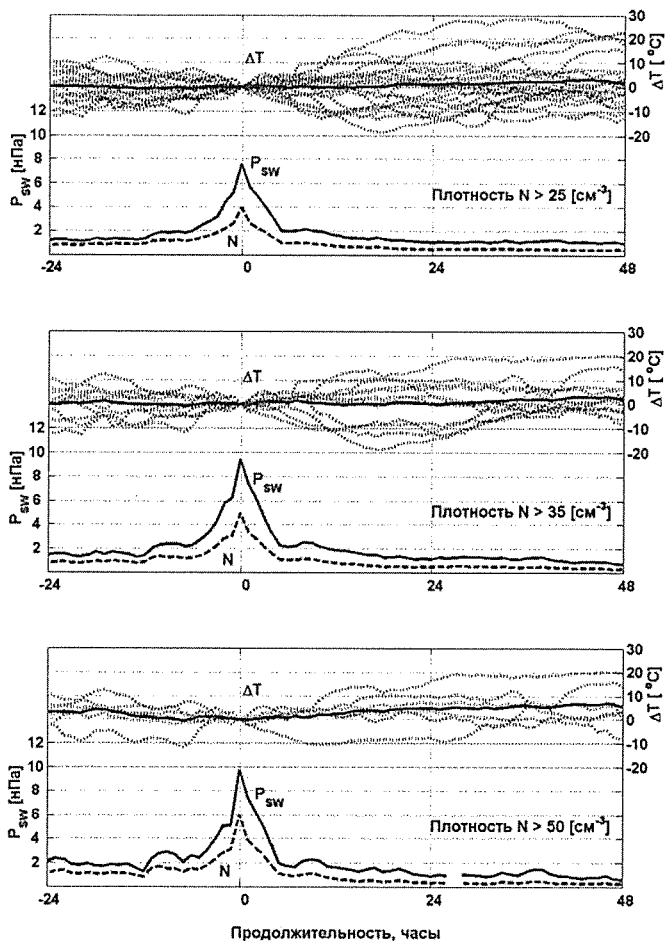


Рис. 6. Изменения наземной температуры ΔT на ст. Купол С в связи с импульсами динамического давления солнечного ветра в 2000/01 г.

ния в межпланетном магнитном поле или совпадают с ними. Поэтому противоположно направленные эффекты от импульсов давления и отрицательных отклонений ММП должны компенсировать друг друга в первый день после контакта с межпланетной ударной волной. В этом случае эффект потепления от межпланетного электрического поля становится очевидным только на второй день после прохождения ударной волны. Атмосферное потепление может начинаться через несколько часов после контакта с возму-

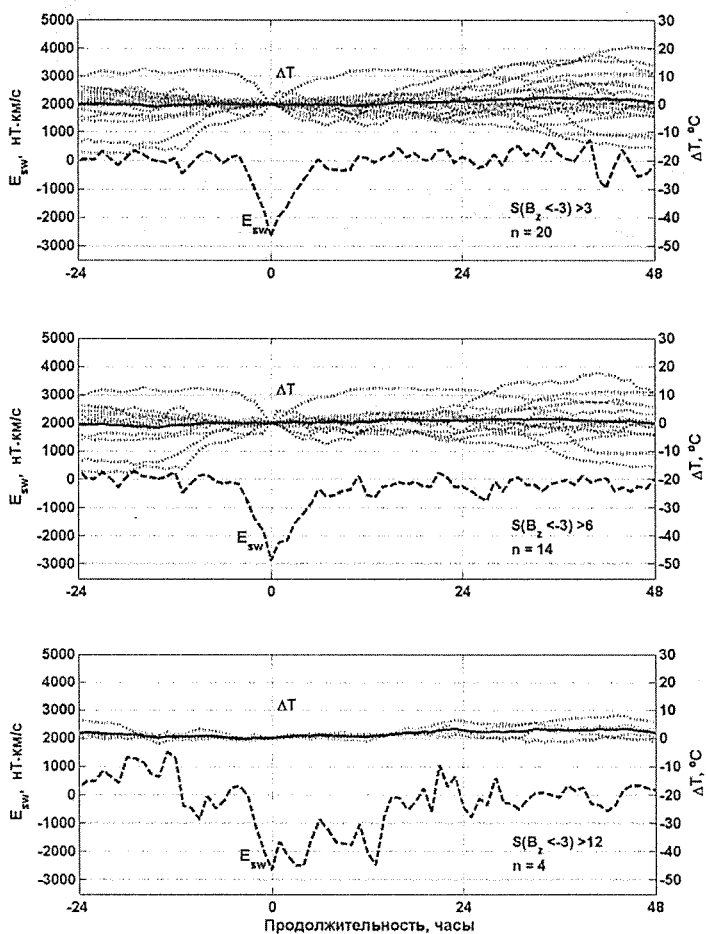


Рис. 7. Изменения наземной температуры ΔT на ст. Южный полюс в связи с вариациями E_{sw} за период 2000/01 г.

щенным электрическим полем, если мощность электрического поля достаточно высока, или скачок в межпланетном электрическом поле значительно запаздывает относительно импульса давления.

Такая же регулярность наблюдается и на ст. Купол С — другой станции, расположенной на Антарктическом ледяном куполе. Изменение температуры на Куполе С, связанные с вариациями межпланетного электрического поля, показаны на рис. 5, как поведение величины ΔT в зависимости от

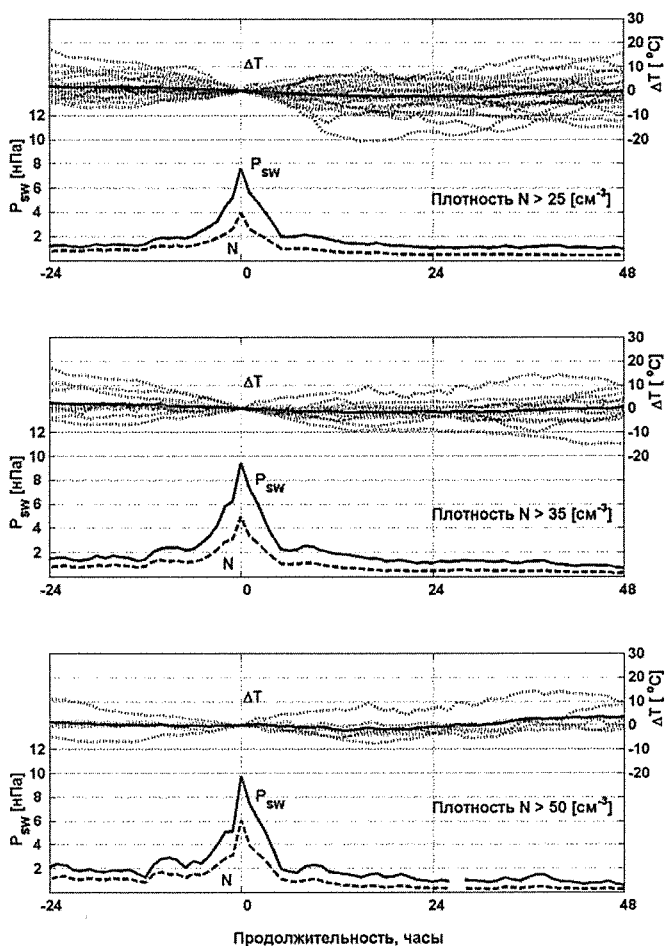


Рис 8. Изменения наземной температуры ΔT на ст. Южный полюс в связи с импульсами динамического давления солнечного ветра в 2000/01 г.

мощности влияния электрического поля. Подобно ст. Восток температура в приземном слое на ст. Купол С растет после ключевого момента с временем задержки около 6–12 часов. Отклик температуры на импульсы в давлении солнечного ветра практически незаметен, за исключением минимума температуры в нулевой момент для событий с высокими значениями давления солнечного ветра (нижний ряд на рис. 6). Возможно, что малая статистика наблюдений не позволяет выявить четкую регулярность.

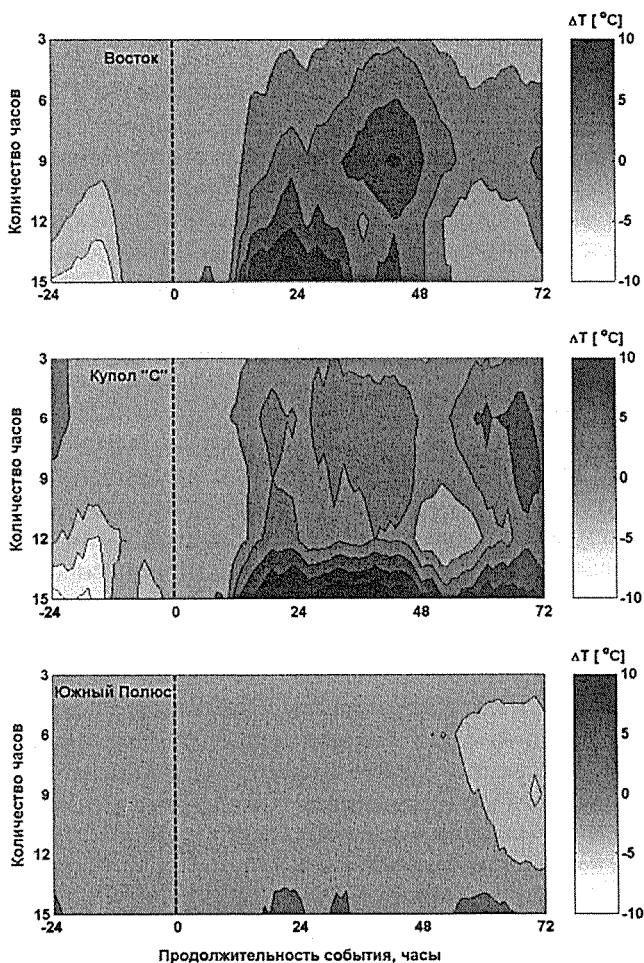


Рис. 9. Характер температурных изменений ΔT на станциях Восток, Купол С, и Южный полюс как функция числа часовых интервалов с отрицательными изменениями межпланетного магнитного поля $B_z < -2nT$

Эффекты влияния солнечного ветра наименее заметны на ст. Южный Полюс, третьей станции, действующей на Антарктическом ледяном куполе. Как показывают рис. 7 и 8, лишь слабая тенденция к увеличению температуры обнаруживается при экстремально возмущенном солнечном ветре. Потепление наблюдается в условиях длительного влияния отрицательного электрического поля (ММП $B_z < 0$), а слабое похолодание на-

блюдается лишь в случаях больших импульсов динамического давления. Этот результат полностью согласуется с выводом [18], что зависимость ΔT от E_{sw} на Южном Полюсе много слабее, чем на ст. Восток и может наблюдаться только при условии очень возмущенного солнечного ветра.

Статистические зависимости, типичные для ст. Восток (рис. 3), Купол С (рис. 5) и Южный Полюс (рис. 7) представлены в обобщенной форме на рис. 9, показывающем время задержки и величину потепления ΔT как функцию числа часовых интервалов ММП с $B_z < -2nT$. Можно видеть, что при 3-х часовом воздействии отрицательного B_z происходит только слабое потепление на ст. Восток и Купол С, с задержкой около 18–36 часов, при 9-ти часовом воздействии температура может повышаться до 10 °С, а время задержки уменьшается до 12–18 часов. Совершенно иная зависимость имеет место на Южном Полюсе. При кратком воздействии отрицательного B_z температура не меняется, оставаясь на нулевом уровне в течение 2-х дней. Некоторая тенденция к повышению температуры проявляется только после 12-ти часового воздействия $B_z < -2nT$, и, безотносительно к длительности воздействия, температура уменьшается на третий день. Таким образом, температурные эффекты на ст. Южный Полюс носят совершенно иной характер, чем на ст. Восток и Купол С.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа подтверждают вывод [18], что вариации солнечного ветра, а именно, большие изменения в межпланетном электрическом поле, влияют критическим образом на температуру в приземном слое в Центральной Антарктике. Действительно, три независимых серии наблюдений, выполненных на ст. Восток (метеорологические измерения, выполнявшиеся вручную на наземном уровне в 1978–1992 гг., аэрологические измерения на высотах 0–20 км над Востоком в 1978–1992 гг. и измерения на автоматическом метеорологическом комплексе MILOS в 2000/01 г.), показывают одну и ту же регулярность — увеличение электрического поля утро-вечер (при $B_z < 0$) влечет за собой потепление в приземном слое. Наблюдения на станциях Купол С и Южный Полюс подтверждают концепцию потепления в Центральной Антарктике при отрицательных отклонениях межпланетного поля E_{sw} . Однако температурные эффекты на ст. Купол С и Южный Полюс оказываются совершенно различными. Действительно, изменения температуры на ст. Купол С достаточно очевидны и подобны изменениям на ст. Восток, тогда как на Южном Полюсе видна только слабая тенденция к таким изменениям, и только при мощном воздействии возмущенного солнечного ветра. Это различие может показаться странным, если учитывать только географические координаты станций. Действительно, станции Восток и Южный Полюс расположены в около-

полюсной области, тогда как ст. Купол С лежит значительно ближе к береговой линии, где влияние циклонической активности должно быть определяющим. В связи с этим было предположено [18], что межпланетное электрическое поле влияет на температуру атмосферы через кататическую систему атмосферной циркуляции, типичную для Центральной Антарктики в зимний сезон. Эта идея кажется очень продуктивной для объяснения различий в изменениях температуры ст. Восток, Купол С и Южный Полюс.

Кататическим ветровым режимом называется мощный стоковый ветер приземных воздушных масс вдоль наклонной поверхности Антарктического ледяного купола. Этот сток определяется негативной плавучестью воздуха, обеспечиваемой сильным радиационным охлаждением атмосферы на поверхности ледникового купола. Крупномасштабная кататическая ветровая система над Антарктикой характеризуется мощными потоками растекающегося воздуха: ветры в околосповерхностном слое движутся в радиальном направлении от главного ледяного хребта, пересекающего Антарктику. Рис. 10, взятый из работы [6], показывает модель стоковых ветров в Антарктике, построенную по экспериментальным данным. Можно видеть, что обе станции, Восток и Купол С, располагаются в зоне Центрального Антарктического хребта, откуда берет начало стоковый ветер. Наоборот, Южный Полюс лежит вдали от Антарктического хребта в области развитых стоковых ветров. Следовательно, мы предполагаем, что различия в температурных эффектах на станциях Восток и Купол С, с одной стороны, и ст. Южный Полюс, с другой, определяются различием в положении станций относительно кататической системы атмосферной циркуляции.

Кататический ветровой режим очень стабилен, особенно в зимний сезон [13]. Условие сохранения масс требует постоянного замещения воздушных масс в околосповерхностном слое в Центральной Антарктике, что означает, что в итоге должна формироваться крупномасштабная система меридиональной циркуляции. Результирующая система тропосферной циркуляции над Антарктикой должна включать сток воздушных масс вдоль склонов ледяного купола, их сильную конвергенцию и восходящий поток около береговой линии, возвратное движение (к центру) в нижней и средней тропосфере, и нисходящий поток в околосполюсной области [2, 7]. Фактически, кататическая система циркуляции подразумевает отсутствие горизонтальной стратификации нижней атмосферы над Центральной Антарктикой: имеется мощный вертикальный канал, где воздушные массы из верхней тропосферы и нижней стратосферы движутся вниз к ледниковому щиту. Можно предположить, что атмосфера над Антарктическим куполом обычно находится в состоянии термодинамического равновесия благодаря суперпозиции постоянного радиационного охлаждения воздушных масс на ледяном куполе и адиа-

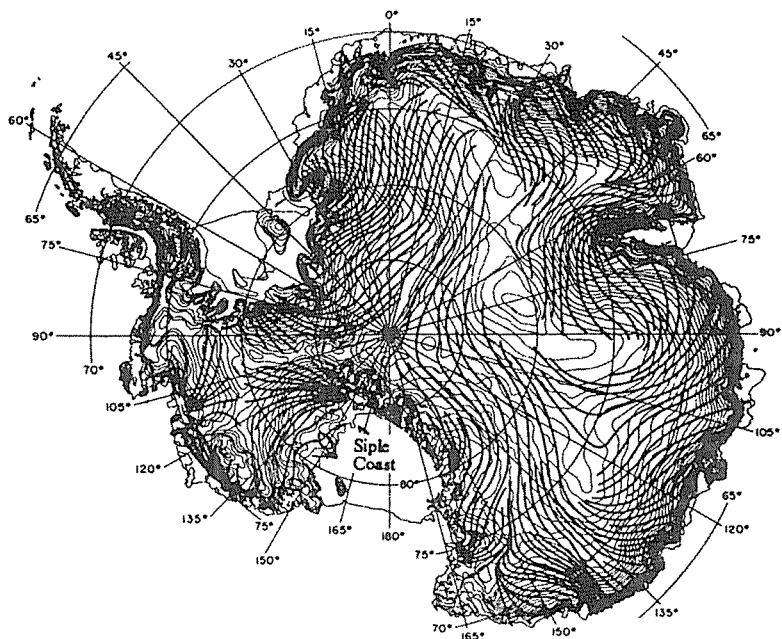


Рис. 10. Система поверхностных стоковых ветров в Антарктике [6].

батического нагревания воздушных масс, которые стабильно поступают сверху. Это равновесие будет нарушаться, если радиационное охлаждение резко ослабеет благодаря появлению отражающего слоя в верхней тропосфере. В таком случае температура атмосферы ниже отражающего слоя должна возрастать, а выше этого слоя — понижаться. Действительно, противоположный характер температурных изменений при $B_z < 0$ на высотах $h < 5$ км (потепление) и $h > 10$ км (похолодание) свидетельствует в пользу этого процесса [18]. Мы предполагаем, что межпланетное электрическое поле воздействует на систему кататической циркуляции, изменяя прозрачность отражающего слоя через посредство глобальной электрической цепи. В этой связи следует напомнить, что глобальное электрическое поле на ст. Восток явно реагирует на вариации межпланетного электрического поля [4], а атмосферная проводимость резко падает как раз в слое ниже 10 км [5]. Отметим, что эффект динамического давления солнечного ветра на отражающий слой должен быть противоположен эффекту межпланетного электрического

поля, если эта гипотеза верна. Механизм влияния солнечного ветра на кататическую циркуляцию неясен и нуждается в дальнейших исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сильные возмущения в солнечном ветре драматически влияют на атмосферную температуру в околополюсной области (станция Восток, Купол С, Южный Полюс). Потепление в приземном слое происходит, если межпланетное электрическое поле утро–вечер увеличивается (при $B_z < 0$). Характер температурного отклика на импульсы давления носит противоположный знак: эффект похолодания фиксируется на ст. Восток как раз после импульсов давления солнечного ветра.

2. Отклонения наземной температуры на ст. Восток и Купол С зависят от мощности воздействия электрического поля: чем дольше время воздействия (и выше интенсивность) электрического поля, тем больше отклонения температуры и короче временная задержка между ключевым моментом и потеплением (вплоть до нескольких часов).

3. Иная закономерность типична для Южного Полюса: при кратком воздействии $B_z < 0$ температура не меняется в первые двое суток; потепление может наблюдаться только при условии воздействия мощного межпланетного электрического поля.

4. Различия в температурных эффектах на ст. Восток и Купол С, с одной стороны, и Южный Полюс, с другой стороны, определяются, по-видимому, различием в положении станций относительно кататической системы циркуляции.

5. Предполагается, что межпланетное электрическое поле влияет на кататическую систему атмосферной циркуляции через глобальную электрическую цепь.

Работа выполнена при финансовой поддержке от подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан», а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-01-05-65235).

Авторы признательны Д-ру Мэтью Лаззара (Антарктический Метеорологический исследовательский центр, Университет Висконсин-Мэдисон) за обеспечение данными наблюдений ст. Южный полюс и Купол С.

Поступила 24.10.2003 г.

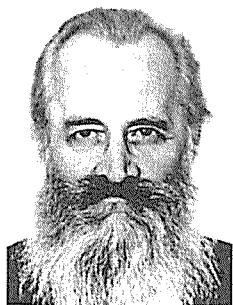
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bering E.A., Few A.A., Benbrook J.R. The global circuit//Physics Today. —1998. —Vol. 5(10). —С. 24–30.
2. Egger J. Slope winds and the axisymmetric circulation over Antarctica//J. Atmos. Sci. —1985. —Vol.42. —С. 1859–1867.

3. *Egorova L.V., Vovk V.Ya., Troshichev O.A.* Influence of variations of the cosmic rays on atmospheric pressure and temperature in the Southern geomagnetic pole region//*J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* —2000. —Vol.62. —C. 955–966.
4. *Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Burns G.B., Papitashvili V.O.* Variations of the atmospheric electric field in the near-pole region related to the interplanetary magnetic field//*J. Geophys. Res.* —2001. —Vol.106. —C. 179–190.
5. *Handbook on Geophysics and the Space Environment /Jursa, A.S. (Ed.).* —Air Force Geophysical Laboratory, USAF,1985.
6. *Parish T.R. Bromwich D.H.* The surface windfield over the Antarctic ice sheets//*Nature.* —1987. —Vol.328. —C. 51–54.
7. *Parish T.R., Bromwich D.H.* Continental scale simulation of the Antarctic katabatic wind regime//*J. Climate.* —1991. —Vol.4. —C.135–146.
8. *Parish T.R.* On the role of Antarctic katabatic winds in forcing large-scale tropospheric motions//*J. Atmos. Sci.* —1992. —Vol.49. —C. 1374–1385.
9. *Pudovkin M.I., Babushkina S.V.* Influence of solar flares and disturbances of the interplanetary medium on the atmospheric circulation//*J.Atmos.Terr.Phys.* —1992. —Vol.54. —C. 841–846.
10. *Pudovkin M.I., Veretenenko S.V.* Cloudness decreases associated with Forbush-decreases of the galactic cosmic rays//*J.Atmos.Terr.Phys.* —1995. —Vol.57. —C. 1349–1355.
11. *Pudovkin M.I., Veretenenko S.V., Pellinen R., Kyro E.* Cosmic ray variation effects in the temperature of the high-latitude atmosphere//*Adv. Space Research.* —1996. —Vol.17. —№ 11. —C. 165–168.
12. *Pudovkin M.I., Veretenenko S.V., Pellinen R., Kyro E.* Meteorological characteristic changes in the high-latitudinal atmosphere associated with Forbush decreases of the galactic cosmic rays//*Adv. Space Research.* —1997. —Vol.20. —№ 6. —C. 1169–1177.
13. *Schwerdtfeger W.* The climate of the Antarctica// *Climates of the Polar Regions*, Orvig, S. (Ed.). —World Survey of Climatology, Elsevier, NY, 1970. —Vol.14. —C. 253–355.
14. *Svensmark H. and Friis-Christensen E.* Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage — a missing link in solar climate relations//*J.Atmos. Solar Terr.Phys.* —1997. —Vol.59. —C. 1225–1232.
15. *Tinsley B.A., Brown G.M., Scherrer P.H.* Solar variability influences on weather and climate: possible connection through cosmic ray fluxes and storm intensification//*Journal of Geophysical Research.* —1989. —Vol.94. —C. 14 783–14 792.
16. *Tinsley B.A., Deen C.W.* Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: a connection via eletrofreezing of supercooled water in high-level clouds?// *Journal of Geophysical Research.* —1991. —Vol.96. —C. 22 283–22 296.
16. *Tinsley B.A., Heelis R.A.* Correlations of atmospheric dynamics with solar activity: evidence for a connection via the solar wind, atmospheric electricity, and cloud microphysics//*Journal of Geophysicl Research.* —1993. —Vol.98. —C. 10 375–10 384.
17. *Troshichev O.A., Egorova L.V., and Vovk V.Ya.* Evidence for influence of the solar wind variations on atmospheric temperature in the southern polar region//*J. Atmos. Solar Terr.Phy.* —2003. —Vol.65. —C. 947–956.
18. *Yasunari T., Kodama S.* Intraseasonal variability of katabatic wind over East Antarctica and planetary flow regime in the Southern Hemisphere//*J. Geophys. Res.* —1993. —Vol.98. —C. 13063–13070,

ЕВГЕНИЙ ГУРЬЕВИЧ НИКИФОРОВ

(к 50 — летию работы в ААНИИ)



2 апреля 2004 г. исполняется 50 лет службы в ГНЦ РФ ААНИИ известного полярного океанолога, доктора географических наук Евгения Гурьевича Никифорова.

Е.Г.Никифоров, выпускник Ленинградского высшего инженерного морского училища имени С.О. Макарова, придя на службу в ААНИИ, сразу же показал себя весьма способным и активным исследователем.

Уже в арктические навигации 1956 и 1957 гг. он участвовал в крупной комплексной новаторской экспедиции по съемке течений Карского моря в качестве руководителя одного из отдельных отрядов на судах «Буй» и «Тювяк». Экспедиция эта впервые в мировой практике океанографических работ выполнила синхронную съемку течений и волнения открытого моря посредством постановки сети автономных буйковых станций.

В 1960 г. Евгений Гурьевич защищает диссертацию на соискание ученой степени кандидата географических наук и вскоре избирается на должность руководителя ведущего морского подразделения института — сектора гидрологического режима с лабораторией гидрохимии и грунтов. Одаренный от природы, умеющий распознать новое и показать его значение, Е.Г.Никифоров творчески ведет исследования по таким крупномасштабным программам, как «Натурный эксперимент по взаимодействию атмосферы и океана», «ПОЛЭКС — Север» и др. Результаты многолетних исследований циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана и атмосферных процессов над ним, выполненных Е.Г.Никифоровым совместно с А.О.Шпайхером, были опубликованы в 1980 г. в капитальной монографии «Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана», по новому раскрывающей главные механизмы взаимодействия и изменчивости водной и воздушной оболочки северной области нашей планеты. Не случайно специалисты называют эту монографию «настойной книгой океанолога-полярника».

К 80-м годам прошлого века внедрение в практику работ ААНИИ новых приборов и техники по всем его многочисленным направлениям исследований, все возрастающая роль ЭВМ в научном процессе потребовали нового подхода к изучаемой среде — океаносфере, криосфере, атмосфере, ионосфере и др., новых методов руководства наукой. Требовался руководитель большой эрудиции, высокого творческого плана, опыта работ в условиях полярных стран, лидер с твердым характером. И такой руководитель нашелся — в 1981 г. Евгений Гурьевич был назначен заместителем директора ААНИИ по научной работе. Он продолжал активную исследовательскую деятельность, развивая традиционные связи института с прикладными организациями, одновременно являясь главным конструктором действующей системы «Север».

Евгений Гурьевич Никифоров как ученый, как руководитель и человек, пользуется большим, заслуженным авторитетом.

За свой выдающийся вклад в познание природы полярных стран Е.Г.Никифоров — заслуженный работник Гидрометслужбы, награжден орденами и медалями.

Многочисленные друзья и коллеги, дирекция и Ученый совет ААНИИ сердечно поздравляют Евгения Гурьевича со столь знаменательной датой его жизни и желают ему крепкого здоровья и новых творческих достижений в исследовании полярных стран!

Редакционная коллегия

УДК 551.521(99)

Параметры изменчивости характеристик радиационного режима на российских антарктических станциях по результатам анализа данных из архива актинометрических измерений на этих станциях. *Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Мишин А.А.* Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып.74, с. 7–18.

Приведено описание создаваемого в ААНИИ архива актинометрических данных российских антарктических станций. Представлены результаты предварительного анализа параметров радиационного режима на этих станциях.

Табл. 5, ил. 3, библи. 9.

UDC 551.521(99)

Parameters of variability of characteristics of a radiating mode at the Russian Antarctic stations by results of the analysis of the data from archive actinometric measurements at these stations. *Sibir E.E., Radionov V.F., Mishin A.A.* Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 7–18.

An archive of actinometrical data from the Russian Antarctic stations, which is being created at AARI, is described. The results of preliminary analysis of the radiation regime parameters for these stations are presented.

Tabl. 5, il. 3, bibl. 9.

УДК 551.571.7: 551.510.41

Содержание и изменчивость водяного пара, углекислого газа и метана в атмосфере Антарктиды и над акваторией Атлантического океана. *Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Баранов Ю.И., Кальсин А.В., Каменогградский Н.Е., Устинов В.П., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Радионов В.Ф.* Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып.74, с. 19–28.

Приведены результаты исследований изменчивости общего содержания в столбе атмосфере водяного пара, углекислого газа и метана и концентрации углекислого газа и метана в приземном слое воздуха на станции Новозеландская, а также концентрации углекислого газа и метана в приземном слое воздуха в Атлантическом океане на различных широтах по пути следования научно-экспедиционного судна (НЭС) «Академик Федоров» от Антарктиды до Санкт-Петербурга. Общее содержание газов в столбе атмосферы определялось по спектрам поглощения солнечного излучения в атмосфере, а концентрации газов измерялись в пробах приземного/приводного воздуха. Исследования были проведены во время сезонных работ 45-й и 46-й Российских антарктических экспедиций (1999–2001 гг.).

Табл. 2, ил. 5, библи. 13.

UDC 551.571.7: 551.510.41

Water vapor, carbon dioxide and methane contents and variability in the Antarctic atmosphere and over the Atlantic ocean. *Kashin F.V., Arefev V.N., Baranov Yu.I., Kal'sin A.V., Kamenogradsky N.Ye., Ustinov V.P., Paramonova N.N., Privalov V.I., Radionov V.F.* Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 19–28.

The results of variability investigations of total contents of water vapor, carbon dioxide and methane in the atmospheric column and carbon dioxide and methane concentrations in near the ground air layer obtained at the Novolazarevskaya station, the carbon dioxide and methane concentrations measured near ocean surface in the Atlantic ocean for different latitudes along the route of the R/V «Akademik Fedorov» from the Antarctica to St.-Petersburg. Total contents of the gases in the atmospheric column were determined by the spectra of solar radiation absorption in atmosphere. The concentration of the gases was measured in air samples taken near the ground and water. The investigations were carried out during seasonal experiments of the 45th and 46th Russian Antarctic Expeditions (1999–2001).

Tabl. 2, il. 5, bibl. 13.

УДК 551.582/210/+551.583.7(99)

Изменения климатических условий на побережье Антаркиды в голоцене. *Веркулич С.Р., Кузьмина И.Н., Пушина З.В., Меллес М.* Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып. 74, с. 29–39.

Изучение литологии, радиоуглеродной хронологии, гранулометрии, геохимии и диатомовой флоры колонок морских и пресноводных донных осадков из оазиса Бангера позволило получить сведения о голоценовых климатических изменениях в этом районе. Относительно теплые климатические условия были здесь в течение периодов 9500–7700 л.н. и 4500–2000 л.н., похолодания имели место между 7700 и 4500 л.н., около 2000 л.н., а также последние 1500 лет.

Сравнение наших интерпретаций с результатами, полученными в ходе палеолимнологических исследований в других районах антарктического побережья, позволило установить периоды однонаправленных климатических изменений в краевой зоне континента (относительно холодные условия среднего голоцена до 4000 л.н., существенное потепление от 4000 до 2500 л.н. и короткое похолодание около 2000 л.н.).

Ил. 4, библи. 16.

UDC 551.582/210/+551.583.7(99)

Holocene climatic changes in the Antarctic coastal areas. *Verkulich S.R., Kuzmina I.N., Pushina Z.V., Melles M.* Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 29–39.

The investigations of lithology, radiocarbon chronology, granulometry, geochemistry and diatoms of marine and lacustrine sediment cores from the Bungee oasis provided a record of climate changes in Holocene for this region. Relatively warm climate conditions occurred within the periods of 9500–7700 and 4500–2000 yrs BP; the climate cooling occurred in the oasis within the periods of 7700–4500 and 2000 yrs BP.

A comparison of our interpretations with the results obtained by paleolimnological studies in the other Antarctic coastal regions allowed to determine the periods of unidirectional climate changes in the marginal area of the continent (relatively cold climate conditions within middle Holocene till 4000 yrs BP, significant warming from 4000 to 2500 yrs BP, and short-term cooling about 2000 yrs BP).

Il. 4, bibl. 16.

УДК 551.524+551.578.46:551.556.4(99)

Реконструкция температуры воздуха и аккумуляции снега в Центральной Антарктиде по результатам изотопных и стратиграфических исследований снежной толщи в шурфах на станции Восток. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Кузьмина И.Н.* Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып. 74, с. 40–65.

Рассмотрены основные факторы, ответственные за формирование изотопного состава снега в Центральной Антарктиде. Результаты стратиграфических и изотопных исследований в трех глубоких шурфах, вскрытых в районе станции Восток, использованы для реконструкции изменения температуры воздуха и скорости накопления снега за последние 200 лет.

Ил. 9, библи. 57.

UDC 551.524+551.578.46:551.556.4(99)

Reconstruction of air temperature and snow accumulation in the Central Antarctica by results of isotope and stratigraphy research of snow depth in borings at «Vostok» station. *Ekaikin A.A., Lipenkov V.Ya., Kuzmina I.N.* Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 40–65.

Main factors responsible for the formation of isotope snow composition in Central Antarctica are presented. Results of stratigraphy and isotope studies in three deep borings stripped in the Vostok Station region are used for reconstruction of air temperature changes and snow accumulation rate for the past 200 years.

Il. 9, bibl. 57.

УДК 556.55(99)

Опыт исследования газового режима подледникового озера Восток. *Липенков В.Я., Истомин В.А., Преображенская А.В.* Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып.74, с. 66–87.

Расчеты, основанные на предположении о стационарности гидрологического режима озера Восток, показывают, что предельные значения концентраций растворенных в подледниковой воде N_2 и O_2 ($1,9\text{--}2,2\text{ см}^3 N_2\text{ г}^{-1}$, $0,6\text{--}0,8\text{ см}^3 O_2\text{ г}^{-1}$), соответствующие равновесию этих газов с гидратом воздуха, должны быть достигнуты на 29 цикле кругооборота воды в озере. Вместе с тем, результаты измерений общего содержания газа в озерном льду 2 свидетельствуют о том, что концентрация N_2 и O_2 в верхней части водного слоя под станцией Восток примерно в 20 раз меньше указанных значений.

Табл. 2, ил. 4, библи. 33.

UDC 556.55(99)

Experience in investigations of the gas budget of subglacial Lake Vostok. *Lipenkov V. Ya., Istomin V. A., Preobrazhenskaya A. V.* Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 66–87.

Calculations based on the hypothesis of stationary hydrological regime of Lake Vostok showed that the extreme concentrations of N_2 and O_2 ($1,9\text{--}2,2\text{ см}^3 N_2\text{ г}^{-1}$, $0,6\text{--}0,8\text{ см}^3 O_2\text{ г}^{-1}$) dissolved in water under the glaciers corresponding to proportion of these gases and air hydrate are to be reached for 29th cycle of water revolution in the lake. Besides, the measurement results of total gas content in the lake ice 2 evidence that the N_2 and O_2 concentration in the upper water layer under the Vostok station is in 20 times less than the above concentrations.

Tabl. 2, il. 4, bibl. 33.

УДК 576.8(99)

Молекулярно-биологическое исследование бактериального состава жидкости для бурения из скважины 5Г-1, станция Восток, Антарктида. *Булат С.А., Васильева Л.П., Пети Ж-Р., Лукин В.В., Алехина И.А.* Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып.74, с. 88–102.

Деконтаминация керна льда Восток является критической процедурой для молекулярно-биологических исследований. Поверхность керна обычно содержит пленку трудно удаляемой достаточно грязной жидкости для бурения, представляющей собой смесь алифатических и ароматических углеводородов и форана. В целях получения достоверных данных о микробном содержании керна льда Восток четыре образца жидкости для бурения (110–3600 м) были проанализированы на присутствие бактерий методами клонирования и секвенирования 16S рРНК гена. В результате были выявлены несколько видов бактерий, в основном рода *Sphingomonas*, обнаруженные также при исследовании льда керна Восток и других в Антарктике. Полученные результаты свидетельствуют как о трудности удаления пленки керосина с поверхности керна льда, так и о необходимости создания базы данных по микробному составу жидкостей для бурения при микробиологическом изучении ледяных кернов.

Табл. 2, ил. 2, библи. 57.

UDC 576.8(99)

Molecular-biological research of bacterial content of a liquid for drilling from a bore 5Г-1, station «Vostok», Antarctica. *Bulat S.A., Vasiljeva L.P., Petit J.-R., Lukin V.V., Alekhina I.A.* Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 88–102.

Decontamination of Vostok ice core is a critical procedure for the molecular and biological investigations. Core surface usually contains a film of contaminated liquid, which is hardly decontaminated for drilling containing a mixture of aliphatic and aromatic hydrocarbons hydrocarbons and forane. To obtain the actual data of microbial content of ice core Vostok four liquid samples for drilling (110–3600 m) were analyzed for presence of bacteria using cloning and sequencing of 16S ribosomal DNA gene. As a result some bacterias were found, mostly, *Sphingomonas* spp., which were found also during the investigations of ice core Vostok and others in Antarctica.

The obtained results evidence about both the difficulties for decontamination of kerosene film from ice core surface and the necessity to create data base of microbial content of liquid for drilling for microbiological investigations of ice cores as well.

Tabl. 2, il. 2, bibl. 57.

УДК 574.583 (269.4)

О роли климатических колебаний в распределении антарктического криля (*Euphausia superba* Dana) и изменчивости популяций некоторых его основных потребителей. Масленников. В.В. Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып. 74, с. 103–129.

В работе рассматриваются некоторые особенности межгодовой изменчивости количественного распределения антарктического криля в разных районах Антарктики, колебаний его пополнения. Кроме того, привлечены литературные данные по изменчивости размеров популяций пингвинов Адели (моря Росса, моря Содружества, о-ва Кинг-Джордж и западного побережья Антарктического п-ова) и Императорских пингвинов (Земля Адели), а также по межгодовым изменениям распределения усатых китов (финвалов и блювалов) в районе о-ва Ю. Георгия. Все эти сведения анализировались с точки зрения концепции воздействия на популяции меридиональной направленности переноса масс в атмосфере (и океане), в свою очередь связанной с климатическими колебаниями как в межгодовом масштабе, так и в масштабе десятилетий. В качестве показателя выступают летние и зимние индексы Южного Колебания, Антарктического Колебания и Эль-Ниньо 3.4. Воздействие климатических колебаний на криль осуществляется в значительной степени через его распределение и заключается в меридиональных сдвигах, приводящих к колебаниям количества криля в основных местах нереста (один из факторов колебания плодовитости), к усилению или ослаблению распространения морского льда (важного фактора выживаемости криля, особенно на его старших личиночных стадиях, пожалуй, главного фактора колебаний пополнения популяции), уменьшению или увеличению внедрений более северного вида – салпа (основного пищевого конкурента для криля). Колебания размеров популяций пингвинов определяются обилием и доступностью пищевых ресурсов в пределах своих «пастбищ» и демонстрируют хорошо выраженную реакцию на многолетнюю тенденцию климатических изменений в конкретных районах их географического расположения. Важную роль в межгодовых колебаниях выживаемости как птенцов, так и взрослых особей играют ледовые условия в местах обитания колоний в критические периоды жизненного цикла пингвинов.

Ил. 10, библи. 62.

UDC 574.583 (269.4)

About the role of climatic oscillations in abundance of the Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) and variability in populations of some main krill consumers. Maslennikov V.V. Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 103–129.

Some features of interannual variability of numerical abundance of Antarctic krill in different Antarctic regions and changes of its reproductivity are presented. Besides, the publication data of variability of population of Adelie Penguin (in the Ross Sea, Commonwealth Sea, King-George island and West Antarctic Peninsula) and Emperor Penguin (in the Adelie Land) and data of interannual changes of abundance of Baleen whales (Fin whales and Blue whales) in the South Georgia Island region were used. The data were analyzed how the meridional direction of mass transport in atmosphere (and ocean), which is connected with climatic oscillations in both interannual scale and decadal one as well, influences on populations. The summer and winter indices of the Southern Oscillation, Antarctic Oscillation and El-Nino 3.4 were used as indicators of the climatic variations. The impact of the climate changes on krill population is made mostly through its abundance and comprises meridional shifts, which provide the quantity krill oscillations in the main spawning places (one of the factors of the productivity oscillations), decrease or increase of sea ice distribution (the important factor for krill survival, especially on the larval stage of the life cycle and possible the main factor of the reproductivity population), decrease and increase of adaptation of more northern

species of salp (the main rival for feeding for krill). The oscillations of penguin population depend on plentiful supply of food within places for feeding and are influenced by multiannual tendency of climate changes in concrete regions. Ice conditions in the places of penguin colonies location within extreme periods of their life play the major role in interannual oscillations of survivability for both young and adult penguins.

II. 10, bibl. 62.

УДК 597.586.2

Новые данные о ранней молодежи липаровых рыб (*Liparidae*, *Scorpaeniformes*) района о-вов Кергелен и Крозе. Чернова Н.В., Дюамель Г. Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып. 74, с. 130–139.

В работе представлены результаты обработки сборов липаровых рыб, выполненных французскими научно-промысловыми экспедициями в 1995–2000 гг. в районе архипелагов Кергелен и Крозе (Южный океан), – всего 45 экземпляров с 31 станции. Выявлен новый вид рода *Paraliparis* по двум экземплярам из района островов Крозе и Кергелен. Определены также следующие глубоководные представители рода *Paraliparis*: *P. copei kerguelensis* (Кергелен, на глубине 790–1055 м; молодая особь длиной 83 мм *SL* на глубине 372–613 м), *P. copei wilsoni* (Крозе, на глубине 700–1040 м), *P. cf. gracilis* (Крозе), *P. operculosus* (Кергелен, на глубине 1129–1295 м, малек длиной 13,2 мм *SL* на глубине 700–750 м), *P. thalassobathyalis* (Крозе и Кергелен, на горизонтах 45–350 м над глубинами 1018–1291 м), *P. neelovi* (Кергелен, малек 35,5 мм *SL*, на горизонте 350 м над глубинами более 1100 м) и *P. cf. neelovi* (Кергелен, малек 35 мм *SL*, на горизонте 250 м над глубиной 1253 м). Малек *Paraliparis* sp. длиной *SL* 44 мм, относящийся, к неопisanному пока виду, найден у островов Кергелен на глубине 400 м над глубинами более 1000 м.

Для каждого вида получены новые данные, включающие морфологические особенности или специфику внутривидовой изменчивости, детализирующие их географическое распространение и вертикальное распределение. Подтверждены различия между *P. c. wilsoni* и *P. c. kerguelensis* по окраске и размеру головы (17–19,6% vs 15–16,5% *SL*), а также найдены дополнительные морфологические признаки, позволяющие легко различать даже особей, утративших кожные покровы, или молодь. Экземпляры от о-вов Крозе, по диагностическим признакам идентичные *P. gracilis*, в то же время отличаются от особей этого вида из типового местонахождения (о. Южная Георгия) рядом существенных характерных особенностей, что, возможно, позволяет в последующем выделить крозетинскую форму в особый подвид, или даже вид, близкий *P. gracilis*. Материал по *P. thalassobathyalis* оказался полиморфным. Обнаружены особи трех морфологических типов, различающихся габитуально (наличие или отсутствие «горба») и особенностями окраски (пигментация хвостовой части тела).

Особый интерес обработанных сборов представляют мальки и ранняя молодь липарид длиной 13–48 мм *SL*, определение которых представляет собой значительные трудности, поскольку таблицы для определения существуют пока только для взрослых экземпляров. Впервые составлена определительная таблица для идентификации молодежи 9 форм рода *Paraliparis* длиной 13–48 мм *SL* из района архипелагов Кергелен и Крозе.

Табл. 1, библи. 9.

UDC 597.586.2

New data of young liparid fish (*Liparidae*, *Scorpaeniformes*) in the region of Kerguelen and Crozet Islands. Chernova N.V., Duhamel G.A. Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 130–139.

The results of investigations of liparid fishes collection performed by French scientific and fishery expeditions in 1995–2000 in the region of Kerguelen and Crozet Islands, totally 45 specimens from 31 stations, are presented. A new species, *P. obliquosus* sp. n., is identified. Other species collected included: *Paraliparis copei kerguelensis*, *P. copei wilsoni*, *P. cf. gracilis*, *P. neelovi* with a closely related form designated as *P. cf. neelovi*, *P. operculosus*, *P. thalassobathyalis*, and also one young fish of an undescribed species, *Paraliparis* sp. Additional diagnostic characters were found for *P. copei wilsoni* and *P. copei kerguelensis*. They include: chin pores open separately (vs in a common pit), interneural

of the first dorsal ray situated between vertebrae 5/6 to 8/9 (vs between 3/4 to 5/6), skin of specimens in alcohol cream-brown (vs milky pale), chin and snout blackish-brown (vs pale), anus slightly behind a vertical through the gill opening (vs slightly in front of it). The Crozet islands constitute an extension of the geographical distribution and of the bathymetric range (700–1040 m vs 960–1134 m) for *P. c. wilsoni*. Some differences in *Paraliparis gracilis* were found between specimens from South Georgia (Atlantic sector of Southern Ocean) and those from the Crozet islands (Indian sector). *Paraliparis operculosus* occurred deeper than previously (1129–1295 m vs 380–1010 m). *Paraliparis thalassobathyalis* appeared polymorphic, with three different types, mainly recognized by the shape of head and body and colour patterns. They might represent sexual dimorphic differences, or epibenthic and pelagic forms, although our material was insufficient for final conclusion. Juveniles of 13,2 – 44 mm SL of *P. obliquosus*, *P. neelovi*, *P. cf. neelovi*, *P. operculosus*, *P. thalassobathyalis* and *Paraliparis sp.* were found pelagically. A field key to early juveniles of the nine *Paraliparis* is proposed.

Tabl. 1, bibl. 9.

УДК 591.3:591.473:597.58.

Происхождение и систематика рыб подотряда нототениевидных (*Notothenioidei*, *Perciformes*) в свете данных онтогенетического анализа. Воскобойникова О. С. Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып. 74, с. 140–160.

На основании сравнительного изучения развития скелета в онтогенезе 32 видов из семи семейств нототениевидных рыб и близких к ним подотрядов окунеобразных рыб, составляющих группу *Blennioidei s.l.*, и данных по остеологии взрослых рыб проведен кладистический анализ и построена кладограмма родственных отношений. Проведенное исследование показывает, что сестринской группой нототениевидных являются подотряды *Zoarcoidei* и *Blennioidei* и семейство *Trispinacidae*. В подотряде *Notothenioidei* выделено два надсемейства *Bovichtioidea* и *Notothenioidea*. Приведены диагнозы подотряда *Notothenioidei* и выделенных надсемейств.

Табл. 1, ил. 4, библи. 78.

UDC 591.3:591.473:597.58.

Origin and systematics of the suborder *Notothenioidei* (*Perciformes*) on the data of ontogenetic analyze. Voskoboinikova O.S. Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 140–160.

Based on the comparative study of the osteological development of 32 species from 7 notothenioid families and related perciform suborders from the *blennioid s.l.* group and also on the osteological data of their adults the cladistic analyze has been held and cladogram has been received. The research shows that notothenioid sister group is suborders *Zoarcoidei* and *Blennioidei* and family *Trispinacidae*. Two superfamilies *Bovichtioidea* and *Notothenioidea* have been distinguished into suborder *Notothenioidei*. Diagnoses of suborder *Notothenioidei* and distinguished superfamilies are presented.

Tabl. 1, il. 4, bibl. 78.

УДК 594.71

Вертикальное распределение фауны мшанок моря Уэдделла, Антарктика. Гонтарь В. И. Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып. 74, с. 161–170.

Более 400 видов из трех отрядов *Cyclostomata*, *Stenostomata*, *Cheilostomata* были найдены в коллекции немецкой Антарктической экспедиции ANT XIII/3 на исследовательском судне «Полярштерн», состоявшейся в 1996 г. Фауна мшанок моря Уэдделла очень разнообразна в систематическом отношении. В ней встречены новые виды и роды. Море Уэдделла характеризуется уникальными условиями существования и они влияют на фауну мшанок. Эта фауна обладает вертикальной зональностью и отличается в различных диапазонах глубин. Эти различия определяются, вероятно, гидрологическим режимом моря Уэдделла и наличием мягких грунтов. Наиболее разнообразна фауна в псевдобатии. На склоне происходит смена фаун между шельфовой и глубоководной фаунами. Для моря Уэдделла характерно преобладание видов с вертикальным ростом колоний во всех диапазонах глубин. Хотя в фауне мшанок

преобладают слабо обызвестленные виды во всех диапазонах глубин, более сильно обызвестленные виды составляют 40 % от общего числа встреченных видов.

Табл. 2, ил. 2, библи. 10.

UDC 594.71

Vertical distribution of fauna pearlworms Weddell Seas, Antarctic Region. *Gontar V.I.* Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 161–170.

More than 400 species of three bryozoan orders Cyclostomata, Ctenostomata, Cheilostomata were found in the collection of German Antarctic expedition ANT XIII/3 on research vessel «Polarstern» in 1996. The fauna of bryozoa of the Weddell Sea has systematic diversity. There were found many new species and new genera for science. The studying area of the Weddell Sea has unique environments and they influence the fauna of bryozoa. There existed depth zonality of bryozoa fauna and the fauna is very different between definite ranges of depths. These existing differences between fauna of different range of depths were connected, probably, with hydrological regime of the Weddell Sea and with the soft bottom grounds. The most different fauna is pseudobathial. There is faunistic transition depth range in the slope between shelf fauna and deep water fauna. It is characteristically for the Weddell Sea the dominance of species with erect mode of colony growth in all depth ranges. Although there are many weakly calcified species in the Weddell Sea bryozoan fauna, more strongly calcified species consist of 40% of total number of occurring bryozoan species.

Табл. 2, ил. 2, библи. 10.

УДК 591.9 + 269.46

Фауна моря Уэдделла и ее особенности. *Сиренко Б.И., Арнц В., Смирнов И.С.* Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып. 74, с. 171–180.

Обсуждается изученность фауны моря Уэдделла, где к настоящему времени известно более 1400 видов беспозвоночных. Одной из основных причин высокой плотности поселений и высокой биомассы бентоса моря Уэдделла является, по-видимому, расположение этого моря в системе круговорота Уэдделла. Эта система круговорота существенно удлиняет летний период откорма бентоса за счет поступления с севера из низких широт живого и отмершего планктона и его фекальных масс. Высокое видовое разнообразие бентоса в море Уэдделла определяется многоярусной структурой поселений донных организмов и их биоценотическими отношениями.

Табл. 2, ил. 4, библи. 22.

UDC 591.9 + 269.46

Fauna of the Weddell Sea and its peculiarities. *Sirenko B., Arntz W., Smirnov I.* Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 171–180.

Our knowledge about the fauna of the Weddell Sea is discussed. At present time we know more than 1400 species of invertebrates in this Sea. Apparently, one of the main reasons of rich settlements and high biomass of the benthos of the Weddell Sea is the Weddell Gyre. Owing to this Gyre the benthos in the Weddell Sea is supplied by food during more long period at the expense of alive and dead plankton organisms and their fecal masses which are brought from the north of the Gyre. The high species diversity of the fauna in the Weddell Sea can be explained by the multilevel settlements of benthic organisms and their biocenotic relationship.

Табл. 2, ил. 4, библи. 22.

УДК 551.509.336

Воздействие возмущенного солнечного ветра на поведение температуры на Антарктическом ледниковом куполе. *Трошичев О.А., Янжура А.В.* Проблемы Арктики и Антарктики, 2003, вып. 74, с. 181–196.

Проведен анализ температурных наблюдений, выполненных в приземном слое с помощью автоматических погодных комплексов (AWS) в точках Купол С и Южный Полюс и

автоматического метеорологического комплекса MILOS на ст. Восток. Ежечасные значения температурных отклонений (ΔT), полученные для зимних сезонов (май-сентябрь) 2000/01 г., были сопоставлены с ежечасными величинами таких характеристик солнечного ветра, как межпланетное электрическое поле и динамическое давление солнечного ветра; при этом за ключевой момент бралось время максимального отклонения в соответствующем параметре солнечного ветра. Результаты анализа подтверждают сделанное ранее заключение, что большие возрастания межпланетного электрического поля утро-вечер приводят к потеплениям на наземном уровне в Центральной Антарктике. Однако эффективность влияния солнечного ветра на температуру атмосферы оказалась очень различной в разных точках Антарктического ледникового щита: станции Восток и Купол С показывают очень похожий и сильный отклик на внешние воздействия, тогда как на ст. Южный Полус отмечается лишь слабая тенденция к таким изменениям. Делается вывод, что различие в температурных эффектах на ст. Восток и Купол С, с одной стороны, и Южный Полус, с другой, определяется разницей в положении станций относительно кatabатической системы циркуляции. Как показывают модели кatabатических ветров, обе станции, Восток и Купол С, располагаются в зоне Центрального Антарктического хребта, где берут начало стоковые ветры, а станция Южный Полус, наоборот, лежит вне этой зоны – в области развитого стокового ветра. Предполагается, что межпланетное электрическое поле оказывает воздействие на кatabатическую систему атмосферной циркуляции, типичную для зимней Антарктики, через посредство глобальной электрической цепи.

Ил. 10, библ. 19.

UDC 551.509.336

Influence of the indignant solar wind on behaviour of temperature on the Antarctic glacial cape.

Troshichev O.A., Yangura A.V. Problems of the Arctic and Antarctic, 2003, vol. 74, p. 181–196.

The temperature observations proceeding by the automatic weather stations (AWS) at Dome C II and South Pole (Clean Air) and by automatic meteorological station MILOS at Vostok provided the basis of the analysis. The hourly values of the temperature deviations (ΔT) have been derived from these measurements for winter season (May–September) of 2000/01. These values were compared with the hourly solar wind characteristics, such as interplanetary electric field and the solar wind dynamic pressure, the time of the maximum deviation in a proper solar wind parameter has been determined as a key moment. Results of our analysis confirm the conclusion, that large increases the interplanetary dawn-dusk electric field influence the warming effect on the ground level in the Central Antarctica. However, extent of the solar wind influence on the atmospheric temperature turned out to be highly different at various sites of the ice sheet: while the temperature response at Dome C II is like to Vostok station, the only slight tendency is displayed at South Pole. The conclusion is made that difference in the temperature effects at Vostok and Dome C II, on the one hand, and South Pole, on the other hand, is determined by different disposition of stations within the katabatic system of circulation. As the pattern of near-surface katabatic winds shows, the both stations, Vostok and Dome C II, are situated in zone of Central Antarctic ridge, where the drainage winds take origin. On contrary, South Pole is out of the Antarctic ridge, in area of the developed drainage winds. It is suggested that the interplanetary electric field influences the katabatic system of atmospheric circulation, typical of the winter Antarctic, by means the global electric circuit.

Ил. 10, библ. 19.

Сборник научных статей
ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

Выпуск 74

Оригинал-макет: А.А.Меркулов

ЛР № 020228 от 10.11.96

Подписано в печать 26.12.03. Формат 60 × 90 1/16. Печать офсетная.

Печ. л. 12,9. Тираж 200 экз.

Цена договорная

Гидрометеониздат, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.