

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ В СЕКТОРЕ МОРЯ ДЕЙВИСА (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) ЗА ПОСЛЕДНИЕ 250 ЛЕТ ПО ДАННЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛЕДЯНОГО КЕРНА ИЗ СКВАЖИНЫ 105-й КМ

инженер Д.О. ВЛАДИМИРОВА, канд. геогр. наук А.А. ЕКАЙКИН

ГНЦ РФ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, vladimirova@aari.ru

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена реконструкции климатической изменчивости за последние 250 лет в секторе моря Дейвиса по данным геохимических анализов керна из скважины 105-й км.

Керн из скважины 105-й км (105-й км трассы Мирный—Восток, 67°26' ю.ш., 93°23' в.д., 1416 м над уровнем моря) был получен в сезон 33-й САЭ (1987/88 г.) тепловым бурением в сухой скважине с помощью снаряда ТЭЛГА-14. Общая длина керна составила 727 м, но для настоящего исследования мы использовали интервал глубин 3,00—109,02 м, отражающий наиболее интересный для нас временной отрезок. Из указанного интервала глубин треть составляют пропуски, распределенные равномерно по всей длине исследуемого керна, причем самый длинный пропуск не превышает 3 м.

В основе исследования лежит изотопный метод, т.е. измерение относительного содержания тяжелых изотопов кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) и реконструкция на основе этих данных температуры воздуха и скорости снегонакопления.

Поскольку в районе 105-го км отсутствует таяние и отмечена достаточно высокая скорость аккумуляции снега по данным инструментальных наблюдений (Липенков и др., 1998; Барков, 1974), составляющая 331—422 мм водного эквивалента в год, профиль изотопного состава содержит не только межгодовой, но и сезонный климатический сигнал.

Актуальность работы обусловлена тем, что выбранный нами временной интервал (250 лет) позволяет сопоставить современные глобальные климатические изменения с изменениями климата в доиндустриальную эпоху.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Изотопный анализ

В основе связи изотопного состава атмосферных осадков с температурой воздуха при их формировании лежит явление так называемого изотопного исчерпывания влаги в воздушной массе, несущей осадки, которое, в свою очередь, обусловлено фракционированием (разделением) изотопов при фазовых переходах. Фракционирование, в первую очередь, связано с тем, что концентрация тяжелых изотопов в жидкости больше, чем в находящемся в равновесии с ней водяном паре, вследствие того что парциальное давление насыщенного водяного пара, состоящего из тяжелых молекул (HD^{16}O или H_2^{18}O) меньше, чем пара, состоящего из легких молекул.

Под изотопным составом подразумевается относительная концентрация (δ), а именно разность отношений абсолютной концентрации тяжелых изотопов в образце и стандарте относительно этого отношения для стандарта, выраженная в промилле:

$$\delta D = \frac{\left(\frac{{}^2\text{H}}{{}^1\text{H}}\right)_{\text{обр.}} - \left(\frac{{}^2\text{H}}{{}^1\text{H}}\right)_{\text{станд.}}}{\left(\frac{{}^2\text{H}}{{}^1\text{H}}\right)_{\text{станд.}}} \cdot 1000$$

для дейтерия (и аналогично для кислорода 18).

За стандарт принимают океаническую воду Standard Mean Ocean Water (SMOW), значение изотопного состава которой по определению равно 0.

Поскольку испарение с поверхности океана протекает в неравновесных условиях, возникающих из-за недонасыщения водяного пара по отношению к океанической воде при данной температуре, возникает так называемый кинетический изотопный эффект. Показателем его интенсивности считается эксцесс дейтерия, который принято выражать следующим образом (Dansgaard, 1964):

$$dxs = \delta D - 8 \delta^{18}\text{O}.$$

Его величина слабо меняется в ходе равновесного процесса конденсации, таким образом сохраняя информацию о температурных условиях в источнике влаги (Jouzel et al., 1982).

Строго говоря, изотопный состав осадков связан не с температурой конденсации как таковой, а с разностью температуры конденсации в месте выпадения осадков и температуры в источнике влаги. Понижение температуры воздушной массы при ее движении из низких широт в высокие приводит к вымыванию влаги из воздушной массы, что, в свою очередь, ведет к изотопному фракционированию. Чем больше понижение температуры, тем больше изотопное истощение и тем ниже изотопный состав осадков.

Тем не менее в первом приближении можно считать, что изменение изотопного состава осадков отражает изменение местной температуры воздуха. Для Антарктики это допущение особенно справедливо, поскольку интенсивность изменчивости температуры в полярных широтах существенно выше, чем в тропиках, где формируется основная доля атмосферной влаги.

При температурных реконструкциях в масштабе тысячелетий необходимо также учитывать такие факторы, как изменение изотопного состава океана, глобальные изменения атмосферной циркуляции, изменение размера и формы антарктического ледяного щита и т.д. Однако в интересующем нас масштабе времени (250 лет) эти параметры можно принять за константы, а значит, признать их влияние на изотопный состав осадков несущественным.

Изотопный состав образцов ледяного ядра из скважины 105-й км был измерен в 2012 г. в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ. Общая длина исследуемого ядра составила 106 м (интервал 3,00—109,02 м), образцы для анализа изотопного состава были отобраны с разрешением 5 см для получения сезонного сигнала. Измеренный профиль изотопного состава (по дейтерию) представлен на рис. 1 а.

Измерения проводились на лазерном анализаторе изотопного состава Picarro L1102-i. В данном приборе применяется технология абсорбционной спектроскопии по затуханию света (WS-CRDS) (детальное описание доступно на сайте <http://www.picarro.com>).

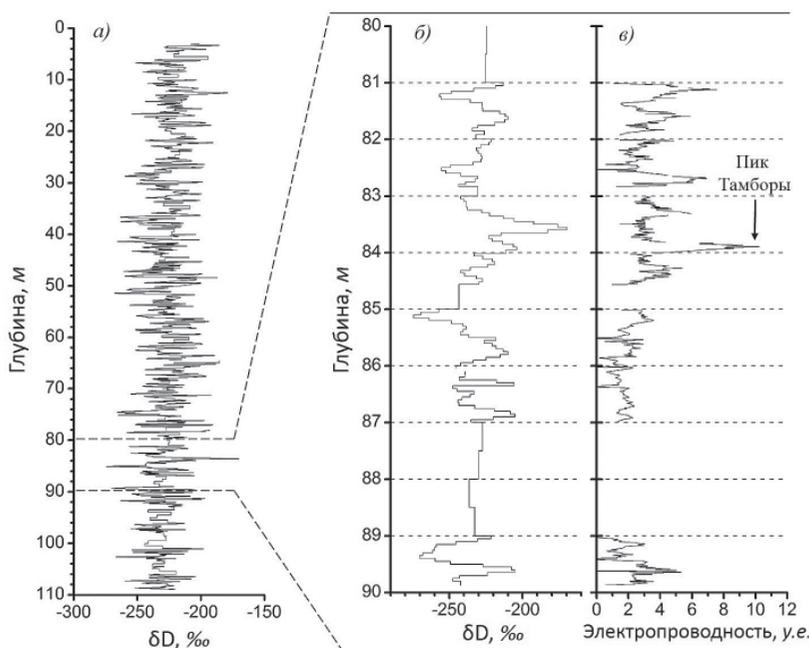


Рис. 1. Изменения изотопного состава (а, б) и электропроводности (в) ледяного керна из скважины 105-й км с глубиной.

Воспроизводимость измерений составила 0,7 ‰ для дейтерия. Такая точность измерений вполне удовлетворительна для выполняемого исследования, поскольку она на два порядка меньше естественной изменчивости изотопного состава в керне 105-й км.

Электропроводность ледяного керна

Совместно с рядом изотопного состава использовалась запись сигнала электропроводности керна, измерение которой было выполнено в гляциологической лаборатории станции Восток в сезон 57-й РАЭ (январь 2012 г.).

На записи (рис. 1 в) отчетливо виден пик электропроводности на глубине 83,9 м, предположительно соответствующий слою, содержащему продукты извержения вулкана Тамбора (1815 г.). Анализ химического состава некоторых образцов исследуемого керна, проведенный в Лимнологическом институте Сибирского отделения РАН (г. Иркутск), показал превышение содержания сульфат-ионов в слое 83,88—83,92 м в 2—4 раза по сравнению с остальной частью керна, обычное для слоев с продуктами вулканических извержений (Hammer, 1980, 1983; Екайкин и др., 2000). Отметим, что в атмосферу над антарктическим пространством осадки, содержащие продукты вулканических извержений, попадают в среднем на год позже самого извержения, а значит, описанный слой датируется 1816 годом.

Датирование ледяного керна

Датирование ледяного керна было произведено с целью преобразования вертикальных профилей исследуемых характеристик во временные ряды. В начале была проведена предварительная датировка путем подсчета годовых слоев по летним максимумам

изотопного состава. Нижняя граница образца с максимальным значением изотопного состава принималась за границу годового слоя. Датировка была скорректирована с учетом глубины залегания предполагаемого слоя Тамборы, для которого известен абсолютный возраст. Сопоставление предварительной датировки с абсолютным возрастом Тамборы позволило оценить ошибку при датировании. Годовой слой, содержащий пик Тамборы, предварительно был датирован 1848 г. Это означает, что для 172 лет (с 1816 по 1987 г.) не было учтено 32 годовых слоя. Следует отметить, что ошибка датировки в основном связана не с трудностями в подсчете годовых слоев в изотопном профиле, а с имеющимися в керне пропусками (общая длина которых составляет порядка 1/3 длины керна). С учетом полученного соотношения была скорректирована предварительная датировка ниже слоя Тамборы и сделана оценка погрешности датирования.

Возраст исследуемого керна на глубине 109,02 м составил 231 ± 8 лет. В значение ошибки заложена неопределенность при датировании пропусков в интервале керна между слоем Тамборы и глубиной 109 м, поскольку предполагается, что погрешность датировки слоя Тамборы, для которого известен абсолютный возраст, равна нулю.

Построение временных рядов изотопного состава и снегонакопления

Для каждого годового слоя в ледяном керне было рассчитано среднее значение изотопного состава. Для вычисления средних годовых значений изотопного состава отсутствовавших участков керна были использованы данные (Masson et al., 2000) с низким разрешением (50 см). Среднее годовое значение изотопного состава рассчитывалось как среднее значение по всем изотопным пробам между двумя границами данного годового слоя.

Также была рассчитана скорость снегонакопления как произведение толщины годового слоя на среднюю плотность этого слоя. Данные о плотности слоя получены путем взвешивания и определения размеров ледяных кернов с разрешением 4—5 м. Плотность на заданной глубине вычислялась с использованием функции аппроксимации, принявшей в нашем случае следующий вид:

$$y = 0,00013132x^3 - 0,05949x^2 + 8,879x + 470,411.$$

Значения изотопного состава и аккумуляции были скорректированы таким образом, чтобы учесть утончение годовых слоев с глубиной, а также тот факт, что более древние слои льда были отложены не в точке бурения, а выше по склону ледника.

Поправка μ на утончение слоев вследствие растекания льда рассчитывалась по упрощенной методике с использованием формулы Ная (Nye, 1963):

$$\frac{a'_k}{a_k} = \frac{H^* - H_k}{H^*} = \mu,$$

где a'_k и a_k — скорость снегонакопления до и после введения поправки соответственно, H_k и H^* — глубина залегания нижней границы годового слоя k и общая толщина ледника, выраженные в ледяном эквиваленте.

Для расчета поправки на адвекцию льда были использованы данные о скорости движения льда в районе 105-го км и данные о распределении скорости накопления снега по профилю Мирный — Восток (Липенков и др., 1998), а также данные о пространственном распределении изотопного состава по указанному профилю (Eckaykin et al., 2002).

В результате расчетов выяснилось, что лед, расположенный на глубине 109 м, образовался на 9,7 км выше по склону от пункта 105-й км, где среднее годовое зна-

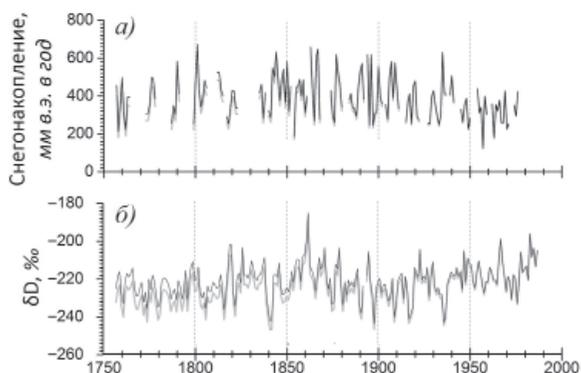


Рис. 2. Средние годовые значения скорости снегонакопления (а) и изотопного состава (б) осадков в пункте 105-й км с 1757 по 1987 гг.

Серые кривые — изменения средних годовых значений характеристик без учета поправок на уточнение годовых слоев и адвекцию льда, черные кривые — с учетом обоих поправок.

чение изотопного состава осадков на 7 ‰ меньше, а скорость аккумуляции на 51 мм водного эквивалента в год ниже. Соответственно поправки на адвекцию имеют положительные значения (рис. 2).

Среднее годовое значение скорости снегонакопления за период 1750—1988 гг. в пункте 105-й км (после введения поправок) оказалось равным 391 мм водного эквивалента в год, что хорошо согласуется с данными современных инструментальных наблюдений (см. введение). Среднее годовое значение изотопного состава (δD) осадков в исследуемом пункте равно -223 ‰. Изменения во времени рассматриваемых показателей представлены на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Восстановление ряда местных средних годовых температур воздуха

Для преобразования ряда средних годовых значений изотопного состава в ряд температуры воздуха за рассматриваемый временной отрезок необходимо вывести изотопно-температурный калибровочный коэффициент с использованием связи между рядом δD и рядом средней годовой температуры воздуха по данным метеонаблюдений на станции Мирный, ближайшей к пункту 105-й км. Такой подход основан на предположении о существовании прямой зависимости изотопного состава осадков от местной температуры (см. раздел *Методика*).

Сравнение изотопного состава с приземной температурой на ст. Мирный (см. сайт www.aari.ru) дает статистически незначимый коэффициент корреляции ($r = 0,16$). Вместе с тем, визуальное сопоставление рядов средних годовых значений изотопного состава и температуры воздуха показывает совпадение короткопериодных колебаний при противоположных трендах (рис. 3 а).

Спектральный анализ ряда средних годовых значений изотопного состава и ряда средних годовых значений температуры воздуха, проведенный в программах “Statistica” и “Analyseries”, позволил выделить в ряду изотопного состава колебания с периодами 6, 9, 19, 32 года и порядка 120 лет (рис. 4). Схожие колебания (с периодами 6, 16—20 и 33 года) были обнаружены и в ряду температуры воздуха на станции Мирный (вековой цикл в этом ряду не выделяется из-за слишком малой длины ряда).

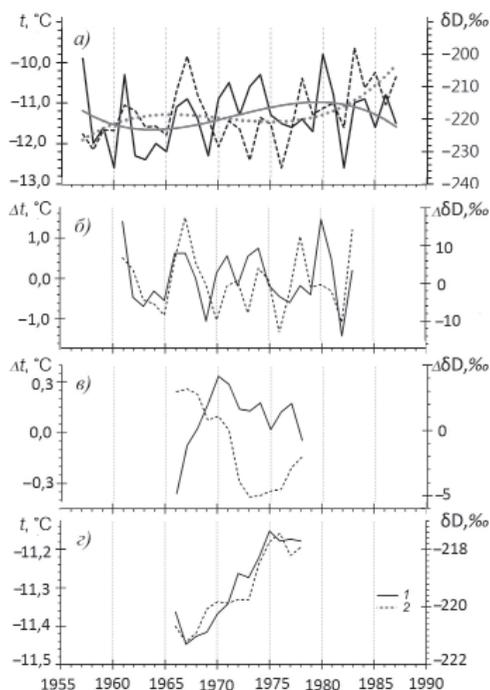


Рис. 3. Сравнение средних годовых значений температуры воздуха на ст. Мирный (1) и средних годовых значений изотопного состава льда (2).

a — исходные ряды (серые кривые — линии тренда, представляющие собой полином третьей степени; *b* — аномалии температуры воздуха и изотопного состава льда в рамках короткопериодной компоненты; *v* — аномалии указанных параметров в рамках 19-летней компоненты; *z* — длиннопериодные колебания температуры воздуха и изотопного состава льда.

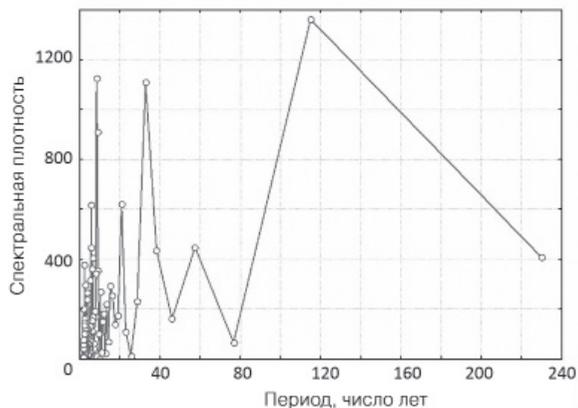


Рис. 4. Периодограмма ряда средних годовых значений изотопного состава льда в керне 105-й км.

Для каждого из циклов, выделенных из ряда методом «пропускания частот», был проведен анализ корреляции между δD и температурой воздуха t . Оказалось, что в рамках высокочастотных колебаний (с периодом 9 лет и меньше) и низкочастотных колебаний (с периодом 30 лет и больше) указанные параметры связаны положительно

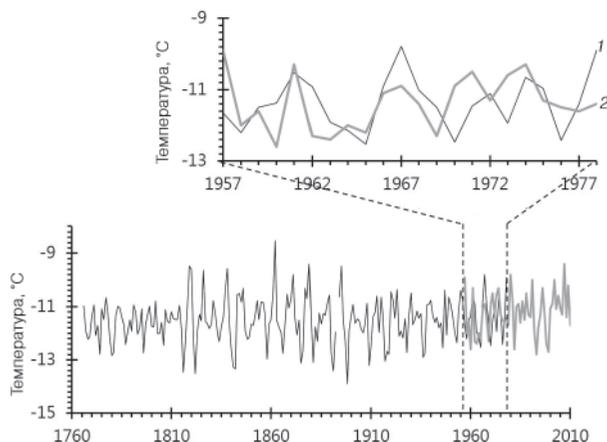


Рис. 5. Средняя годовая приземная температура воздуха в районе ст. Мирный, восстановленная по данным изотопного состава льда в керне из скважины 105-й км (1), и наблюдаемая в обсерватории Мирный (2).

Внизу — за период 1766—2010 гг.,верху — за период 1957—1978 гг.

(рис. 3 б, г) — коэффициенты корреляции равны 0,40 и 0,94 соответственно. В то же время, в рамках 19-летнего периода эти два параметра связаны отрицательно ($r = -0,35$) (рис. 3 в). Здесь и далее коэффициенты корреляции приводятся с уровнем значимости 5 %.

Использование данных о температуре воздуха на станции Мирный на изобарической поверхности 850 гПа, расположенной приблизительно на высоте пункта 105-й км, не приводит к увеличению коэффициентов корреляции, поэтому в дальнейших расчетах были использованы данные о приземной температуре воздуха.

Линейные уравнения связи, выведенные отдельно для каждой из компонент ряда изотопного состава осадков и ряда местной температуры воздуха, позволили реконструировать соответствующие компоненты ряда температуры и получить сам ряд средней годовой температуры воздуха с 1766 по 1978 г. путем сложения компонент. К восстановленному ряду температуры был добавлен ряд метеонаблюдений на ст. Мирный с 1957 по 2010 г. (рис. 5).

Климатическая изменчивость в секторе моря Дейвиса за последние 250 лет

Полученные данные позволяют предположить, что за последние 250 лет температура воздуха в исследуемом районе повысилась на 0,5 °C (от -11,7 до -11,2 °C), что характерно и для других береговых районов континента (см., например, Masson et al., 2000; Mayewski et al., 2004). Восстановленный ряд показывает слабую тенденцию повышения температуры воздуха до начала XIX века, затем температура практически не изменяется, а с начала XX века вновь начинает повышаться (см. рис. 5). Интересно, что на протяжении всего XIX столетия отмечается повышенная амплитуда межгодовой изменчивости данного показателя. По-видимому, это связано со сменой климатических условий в конце Малого ледникового периода, характеризующейся увеличенной межгодовой изменчивостью температуры воздуха (Goose et al., 2012).

Реконструированный ряд скорости снегонакопления демонстрирует тенденцию к ее уменьшению, по крайней мере, с середины XIX столетия (см. рис. 2 а). Возможной причиной этого может являться расположение пункта бурения 105-й км в зоне

мегадюн — форм ледникового рельефа высотой порядка нескольких метров и длиной 2—5 км. Иными словами, причиной наблюдаемого тренда снегонакопления могут быть не климатические изменения, а ветровое перемещение мегадюн.

С другой стороны, снижение скорости аккумуляции снега в XX веке не противоречит прочим данным по береговым районам Антарктиды (Kaczmarzka et al., 2004). Так, например, на горе Гауссберг (66,8° ю.ш., 89,2° в.д.), расположенном на расстоянии 170 км от ст. Мирный, с 1902 по 1957 г. на 15 обследованных пунктах выявлено снижение скорости снегонакопления (Климат..., 1973). Следует отметить также схожесть общих тенденций к снижению аккумуляции снега с близлежащим пунктом 200-й км (Екайкин и др., 2000) на всем исследуемом временном отрезке (рис. 6 б). Таким образом, наблюдаемый тренд в ряду снегонакопления мог возникнуть и по климатическим причинам.

Имеющиеся данные о химическом составе образцов ледяного керна показали пониженное (в среднем в два раза и более) содержание ионов натрия в слоях льда, относящихся к XIX веку, по сравнению с более молодыми слоями (рис. 6 г). Существует мнение о том, что источником морских солей в ледяных кернах служит не открытое морское пространство, а морской лед. Механизмы такого явления обсуждаются в ряде работ (см., например, Rankin et al., 2002; Wagenbach et al., 1998; Wolff et al., 2003). Поводом для дискуссий послужило отложение морских солей преимущественно в зимних слоях ледяных кернов в береговых районах Антарктиды. Проверка распределения ионов натрия по сезонам года в керне из скважины 105-й км показала наибольшее содержание этого элемента в летних и осенних слоях, когда площадь морского льда наименьшая. Поскольку натрий в керне из скважины 105-й км имеет преимущественно (80 %) морское происхождение (Осипов, персональное сообщение, 2013), можно сделать предположение о прямой зависимости концентрации натрия в осадках от площади морского пространства, свободного от льда. Таким образом, сниженное содержание ионов натрия в слоях, датируемых XIX веком, может свиде-

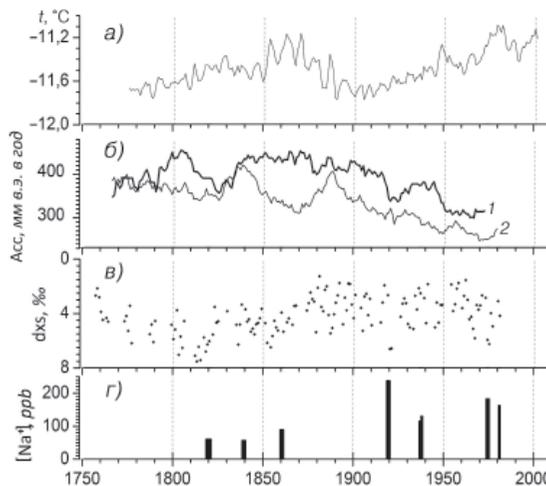


Рис. 6. Изменчивость климатических характеристик в секторе моря Дейвиса за последние 250 лет. *a* — реконструированный ряд температуры воздуха в районе ст. Мирный; *б* — ряды скорости снегонакопления в пункте 105 км (1) и в пункте 200 км (2); *в* — средние годовые значения эксцесса дейтерия (ось ординат перевернута); *г* — содержание ионов натрия в некоторых образцах ледяного керна из скважины 105-й км (данные предоставлены ЛИИ СО РАН). Ряды на рис. 6 *a* и *б* сглажены по 23 годам.

тельствовать об увеличенной площади морского льда в конце Малого ледникового периода в исследуемом секторе Антарктики.

Еще одним доказательством увеличения площади морского льда в Малый ледниковый период в исследуемом секторе Антарктики служит повышенное значение эксцесса дейтерия до середины XIX века по сравнению с современной эпохой (рис. 6 в). Уменьшение площади морского льда влечет за собой увеличение испарения влаги с поверхности моря в высоких широтах, что, в свою очередь, приводит к понижению средневзвешенной температуры в районе формирования воздушной массы и вследствие этого к уменьшению значения эксцесса дейтерия в осадках.

Увеличенная до середины XIX века площадь морского льда подтверждается также данными моделирования (Goose et al., 2012).

Интересно, что в современную эпоху выявляется положительная связь между температурой воздуха по данным метеонаблюдений на ст. Мирный и площадью распространения морского льда в секторе 100—120° в.д. (см. сайт <http://www.antcrc.utas.edu.au>).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции r между приземной температурой воздуха по данным метеонаблюдений на ст. Мирный и степенью распространения морского льда на разной долготе λ за период с 1973 по 1997 г.

λ° в.д.	0	10	20	30	40	30	60	70	80	90
r	-0,24	-0,10	0,19	0,43	0,32	0,15	0,07	-0,11	-0,11	0,16
λ° в.д.	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
r	0,39	0,49	0,28	0,11	-0,19	-0,40	-0,33	-0,03	0,23	

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.

Возможная причина прямой связи местной температуры воздуха и площади морского льда восточнее исследуемого пункта может заключаться в смещении циклонического центра действия атмосферы. Если индоокеанский циклонический центр действия атмосферы ослабевает, он продвигается к югу, меридиональный градиент давления при этом уменьшается, температура воздуха в прибрежном районе повышается, ледовитость моря к востоку от исследуемого пункта увеличивается, и, наоборот (Косенко, Смирнов, 2008). Циклонический центр действия атмосферы (располагающийся в индоокеанском секторе Южного океана на 64° ю.ш. и 99° в.д. (Розанова, 2006)), определяет перенос теплых воздушных масс в передней части (на западе циклонического центра действия атмосферы) и холодных воздушных масс в тыловой части (на востоке ЦЦДА), чем и может объясняться прямая корреляционная связь между приземной температурой воздуха на ст. Мирный и площадью морского льда восточнее исследуемого сектора.

Периодические изменения климатических характеристик

Как указано выше, ряд изотопного состава (температуры воздуха) на фоне общего положительного тренда характеризуется целым набором периодических колебаний: 6, 9, 19, 32 года и порядка 120 лет. Схожий набор циклов характерен и для ряда снегонакопления. Подобная периодичность была отмечена ранее в расположенном неподалеку пункте 200-й км, для которого есть данные по снегонакоплению за последние 350 лет (Екайкин и др., 2000): 2,5; 4—6; 10; 19 и 39 лет. В пункте 200-й км они объясняются как гляциологическими факторами (миграция через данную точку

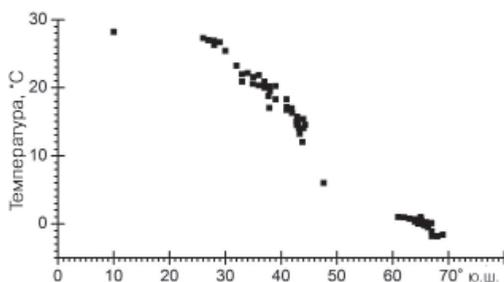


Рис. 7. Распределение по широте температуры поверхностного слоя вод в Индийском океане (см. сайт <http://data.giss.nasa.gov/o18data/>).

форм снежного рельефа), так и климатическими (изменения площади морского льда, циклонической деятельности и солнечной активности).

Короткопериодные циклы (около 8—10 лет) могут быть ассоциированы с прохождением антарктической циркумполярной волны, проявляющейся в изменениях давления на уровне моря, скорости ветра, температуры поверхностных вод и степени распространения морского льда (White and Peterson, 1996).

Девятнадцатилетний цикл представляет наибольший интерес, поскольку для него, как указано выше, характерна отрицательная связь между изотопным составом осадков и местной температурой воздуха. Для выявления возможного механизма такой связи нами была использована простая изотопная модель (Salamatin et al., 2004). Проведенные тесты показали, что подобная ситуация может возникнуть, если температура в источнике влаги меняется в три раза быстрее, чем температура конденсации. Согласно общим климатическим закономерностям такая ситуация маловероятна, однако не исключено, что более значительные изменения температуры в источнике влаги связаны с широтным смещением района формирования воздушной массы. Возможный механизм заключается в следующем. Допустим, источник влаги смещается на несколько градусов к северу, температура в источнике при этом сильно повышается (рис. 7), а температура конденсации остается почти неизменной (или слабо повышается). Изотопный состав осадков при этом понижается.

Предложенный механизм косвенно подтверждается тем, что 19-летний цикл проявляется также в морских температурных аномалиях как в Южном полушарии, так и общепланетарно (см. сайт <http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>).

В свою очередь, аномалии температуры поверхности океана через интенсивность и динамику центров действия атмосферы могут быть связаны с изменением притока солнечного тепла за счет изменения продолжительности тропического года и оборота Солнца вокруг центра массы (Федоров, 2013; Коваленко и др., 1991), а также с приливным перемешиванием вод (Смирнов и др., 2004).

Наконец, долгопериодные колебания (с периодом порядка 120 лет) также были отмечены ранее в различных районах Антарктиды (Masson et al., 2000) и, как считается, могут быть связаны с солнечной активностью и/или быть следствием изменений океанической термохалинной циркуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По вновь полученным геохимическим данным о ледяном керне из скважины 105-й км была реконструирована климатическая изменчивость в секторе моря Дей-

виса (Восточная Антарктида) за последние 250 лет (1757—2010 гг.). Ряд температуры воздуха предполагает общее потепление на 0,5 °С, что не противоречит общепланетарному тренду. При этом наблюдается уменьшение скорости аккумуляции снега, что может объясняться как миграцией через пункт 105-й км снежных форм рельефа, так и общими климатическими изменениями.

Спектральный анализ позволил выявить периоды изменчивости климатических характеристик в пункте 105-й км длиной 6, 9, 19, 32 года и порядка 120 лет. Интересно, что в рамках 19-летнего цикла корреляционная связь температуры воздуха и изотопного состава осадков отрицательная, а в рамках коротко- и длиннопериодных циклов — положительная. Как показывают расчеты с помощью простой изотопной модели, отрицательная связь между местной температурой воздуха и изотопным составом осадков может быть обусловлена широтным смещением района формирования воздушной массы.

Есть основание полагать, что площадь морского льда в исследуемом секторе Антарктики также уменьшилась за последние 250 лет. Данное предположение подтверждается пониженным содержанием ионов натрия и повышенными значениями эксцесса дейтерия в более древних слоях керна, сформировавшихся в XIX веке.

В современную эпоху выявляется положительная связь между температурой воздуха по данным метеонаблюдений на ст. Мирный и площадью распространения морского льда восточнее исследуемого пункта (в секторе 100—120° в.д.), что, вероятно, может быть обусловлено смещением индоокеанского циклонического центра действия атмосферы.

Авторы выражают благодарность сотрудникам сезонной 33-й САЭ, принимавшим участие в бурении и получении керна, В. Я. Липенкову и Ж.М. Барнола за данные по плотности ледяного керна из скважины 105-й км, В. Заровчатскому за помощь в полевых работах, А. Козачек за содействие в лабораторных исследованиях изотопного состава, сотрудникам Лимнологического института СО РАН и лично Т.В. Ходжер, Л.П. Голобоковой и Э. Осипову за проведение химического анализа и предоставленные данные.

Работа выполнялась в рамках Проекта 2 подпрограммы «Антарктика» ФЦП «Мировой океан» и темы 1.5.4.4. ЦНТП Росгидромета «Гляциологические и изотопные исследования ледяных кернов и атмосферных осадков с целью изучения прошлых и современных изменений климата и окружающей среды полярных областей» при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-05-00607) и отдела подготовки кадров ААНИИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барков Н.И.* (1974). Аккумуляция снега на профиле Мирный — Восток в 1970—1973 гг. // Материалы гляциол. исследован. Вып. 24. С. 255—257.
- Екайкин А.А., Липенков В.Я., Барков Н.И., Пети Ж.Р., Стивенард М.* (2000). Изменение аккумуляции снега за последние 350 лет на склоне Антарктического ледяного покрова в 200 км от обсерватории Мирный//Криосфера Земли. Т. IV, №2. С. 57—66.
- Екайкин А.А.* (2003). Метеорологический режим Центральной Антарктиды и его роль в формировании изотопного состава снежной толщи //Дис. ... канд. геогр. наук. —СПб. 170 с.
- Климат полярных районов (1973)/ Пер. А.Я. Миневич, Н.П. Подобина. —Л.: Гидрометеоздат. 444 с.
- Коваленко В.Д., Кизим Л.Д., Пашестюк А.М.* (1991). Влияние изменчивости гравитационного поля Солнечной системы на климат Земли // Изв. ВГО. Т. 123, вып. 4. С. 328—339.
- Косенко А.В., Смирнов Н.П.* (2008). Многолетняя динамика ледового покрова морей Южной полярной области и ее связь с атмосферной циркуляцией// Ученые записки РГГМУ. №7. Гидрология. С. 81—91.

- Липенков В.Я., Екайкин А.А., Барков Н.И., Пурше М.* (1998). О связи плотности поверхностного слоя снега в Антарктиде со скоростью ветра // *Материалы гляциол. исслед.* Вып. 85. С. 148—158.
- Розанова И.В.* (2006). Циклонические центры действия атмосферы, циркуляция и климат Южной полярной области во второй половине XX столетия // *Автореф. дис. ... канд. геогр. наук.* —СПб.: Изд-во РГГМУ. 30 с.
- Смирнов Н.П., Саруханян Э.И., Розанова И.В.* (2004). Циклонические центры действия атмосферы Южного полушария и изменения климата. —СПб.: Изд-во РГГМУ. 208 с.
- Федоров В.М.* (2013). Межгодовые вариации продолжительности тропического года // *Доклады РАН. Сер. Геофизика.* Т. 451, №1. С. 1—4.
- Dansgaard W.* (1964). Stable isotopes in precipitation // *Tellus.* V. 16, P. 436—468.
- Eckaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Barkov N.I., Petit J.R., Masson-Delmotte V.* (2002). Spatial and temporal variability in isotope composition of recent snow in the vicinity of Vostok Station: Implications for ice-core interpretation // *Annals of Glaciology.* V. 35. P. 181—186.
- Goose H., Braida M., Crosta X., Mairesse A., Masson-Delmotte V., Mathiot P., Neukom R., Oerter H., Philippon G., Renssen H., Stenni B., van Ommen T., Verleyen E.* (2012). Antarctic temperature changes during the last millennium: evaluation of simulations and reconstructions // *Quat. Sci. Reviews.* V. 55. P. 75—90.
- Hammer C.U.* (1980). Acidity of polar ice cores in relation to absolute dating, past volcanism and radioechoes // *J. Glaciology.* V. 25, No. 93. P. 359—371.
- Hammer C.U.* (1983). Initial direct current in the buildup of space charges and the acidity of ice cores // *J. Phys. Chemistry.* No. 87. P. 4099—4103.
- Jouzel J., Merlivat L., Lorius C.* (1982). Deuterium excess in an East Antarctic ice core suggests higher relative humidity at the oceanic surface during the last glacial maximum // *Nature.* V. 299, No. 5885. P. 688—691.
- Kaczmarzka M., Isaksson E., Karlöf L., Winther J.-G., Kohler J., Godtliobsen F., Ringstas Olsen L., Hofstede C. M., Van den Broeke M. R., Van de Wal R. S. W., Gundestrup N.* (2004). Accumulation variability derived from an ice core from coastal Dronning Maud Land, Antarctica // *Annals Glaciol.* V. 39. P. 339—345.
- Masson V., Vimeux F., Jouzel J., Morgan V., Delmotte M., Ciais Ph., Hammer C., Johnsen S., Lipenkov V.Ya., Mosley-Thompson E., Petit J.-R., Steig E.J., Stievenard M., Vaikmae R.* (2000). Holocene climate variability in Antarctica based on 11 ice-core isotopic records // *Quat. Res.* V. 54. P. 348—358.
- Mayewski P. A., Maasch K. A., White J. W. C., Steig E. J., Meyerson E., Goodwin I., Morgan V. I., Van Ommen T., Curran M. A. J., Souney J., Kreutz K.* (2004). A 700 year record of Southern Hemisphere extratropical climate variability // *Annals Glaciol.* V. 39. P. 127—132.
- Nye J.F.* (1963). Correction factor for accumulation measured by the thickness of the annual layers in an ice sheet // *J. Glaciology.* V. 4, No. 36. P. 785—788.
- Rankin A.M., Wolff E.W., Martin S.* (2002). Frost flowers – implications for tropospheric chemistry and ice core interpretation // *J. Geophys. Res.* V. 107(D23). 4683. doi:10.1029/2002JD002492.
- Salamat A.N., Eckaykin A.A., Lipenkov V.Ya.* (2004). Modelling isotopic composition in precipitation in Central Antarctica // *Материалы гляциол. исслед.* Вып. 97. С. 24—34.
- Wagenbach D., Ducroz F., Mulvaney R., Keck L., Minikin A., Legrand M., Hall J.S., Wolff E.W.* (1998). Seasalt aerosol in coastal Antarctic regions // *J. Geophys. Res.* V. 103 (D9). doi: 10.1029/97JD01804.
- White W.B., Peterson R.G.* (1996). An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent // *Nature.* V. 380. P. 699—702.
- Wolff E.W., Rankin A.M., Röthlisberger R.* (2003). An ice core indicator of Antarctic sea ice production? // *Geophys. Res. Lett.* V. 30, No. 22. doi: 10.1029/2003GL018454.