

УДК 551.324”312”

ВЛИЯНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА БАЛАНС МАССЫ ЛЕДНИКА о. ГАЛИНДЕЗ

В.Е. Тимофеев, В.Ф. Грищенко

Український научно-дослідницький гідрометеорологічний інститут, Київ, Україна, tvvlad@mail.ru

Реферат. В статье рассматривается влияние фазы явления Эль-Ниньо на гляциальный климат региона. На фоне теплой фазы явления формируются отрицательная аномалия температуры воздуха и положительный баланс массы, а на фоне холодной фазы (Ла-Нинья) – положительная аномалия температуры воздуха, со значительной абляцией на леднике. Отмечены отличие метеорологического режима ледниковой части Антарктического полуострова от условий станции Академик Вернадский и необходимость продолжения исследований прибрежной и внутренней частей покровного оледенения.

Вплив регіональних змін клімату і атмосферної циркуляції на баланс маси льодовика о. Галіндез. В.Є. Тимофеев, В.Ф. Грищенко

Реферат. У статті розглянуто вплив фази явища Ель-Ніньйо на гляціальний клімат регіону. На тлі теплої фази явища формуються від'ємна аномалія температури повітря і додатний баланс маси, а на тлі холодної фази (Ла-Нінья) – додатна аномалія температури повітря, із значною абляцією на льодовику. Вказано на відміну метеорологічного режиму західного узбережжя Антарктичного півострова від його східної і внутрішньої частин і на необхідність продовжувати дослідження покривного зледеніння півострова.

Regional changes of climate and atmospheric circulation and balance of mass of small glacier at Galindez Island. V.E. Tymofeyev, V.F. Grishchenko

Abstract. The effect of the ElNiño on the glacial climate of the region is discussed. Negative air temperature anomalies at Antarctic Peninsula with predominant accumulation are formed in positive ENSO phase, and positive air temperature anomalies with predominant ablation are formed under LaNiña conditions. Difference in the meteorological regime between the western coast of Antarctic Peninsula is noted and the need for continuing research into coastal and internal regions of the Antarctic Peninsula is stressed.

Keywords: Climate warming, mass balance, snow cover, Antarctic Peninsula, atmospheric circulation

1. Введение

Изучение оледенения Антарктиды было в центре многих проектов Международного полярного года (МПГ) 2007-2008 как отражение важнейшей роли обширных снежно-ледовых массивов в формировании глобального климата. Континентальный ледниковый щит

Антарктиды, формируя холодный климат и будучи устойчивым к внешним атмосферным воздействиям, несет информацию о прошлом климате. Задолго до МПГ в центральной части континента были организованы стационары (станция Восток, точки А, В, С и т.д.) с бурением ледников и последующим анализом кернов методами химической, изотопной стратиграфии толщи льда (Режим..., 1992, Зотиков, 1998, Eisen et al., 2005). Керна со ст. Восток, полученный в результате бурения ледника практически до основания его ложа – поверхности подледникового озера, позволил восстановить колебания температуры планеты за предыдущие почти 450 000 лет (Petit et al., 2004). Наиболее известным европейским проектом является EPICA (<http://www.esf.org/index.php?id=855>), бурение проводится также в Гренландии, на леднике г. Эльбрус и в других районах (Delmonte et al., 1998).

Баланс массы поверхности ледников также используется как показатель изменения современного климата (Petit, 2004, Eisen et al., 2005, Rotschky, G. et al., 2007), причем в континентальной части Антарктиды, будучи стабильным в условиях преобладания отрицательной температуры, он служит для оценки крупномасштабных атмосферных процессов (Захаров и др., 1990). Напротив, в краевых районах Антарктиды, Арктическом бассейне, а также в горных районах умеренных широт Северного полушария баланс массы отрицателен в последние годы из-за потепления (Золотарев и др., 2005, Мавлюдов, 2006, Ingolfsson et al., 2002, Hinzmn et al., 2005, Kelsey et al., 2010).

К другому типу ледников, деградирующих в условиях потепления, относят шельфовое оледенение прибрежной части южных морей. Наибольшие изменения коснулись шельфовых ледников и краевых частей покровного оледенения Антарктического п-ва. Наиболее грандиозные отколы шельфового ледника Ларсена в 2002 г. последовали за наиболее теплым пятилетием 1996–2000 гг. в сочетании с усилением отжимных ветров (Turner et al., 2002, Smith et al., 2007). Отметим, что данный отрыв ледяного шельфа произошел как реакция на региональное потепление в противоположность отколам, возникающим за счет разрастания шельфа после периода преобладающей аккумуляции, как, например, для шельфового ледника Ларсена в 1980-х (Режим..., 1992). Роль атмосферной циркуляции в изменении климата антарктического региона рассматривается также в (Груза и др., 2007, Мартазинова и др., 2007).

Более сложные факторы составляют баланс массы ледников, расположенных в циклонической зоне Южного океана, со значительным количеством атмосферных осадков, выпадающих в разных фазях (Kerg et al., 2010). В таких районах традиционно используется полигонный метод измерения, объективно отражающий изменение баланса массы поверхности, складываемой из сезонной абляции и аккумуляции. Несмотря на большое число научных станций в районе Антарктического полуострова, исследования баланса массы на ледниках проводятся нерегулярно. Одно из первых описаний особенностей оледенения о. Десеппен составлено проф. Л.С. Говорухой (Orheim et al., 1982), известны также более поздние работы польских исследователей на о. Кинг-Джордж (Kejna et al., 1998). В этих исследованиях, а также в приведенных ранее данных баланса массы поверхности ледника на о. Галиндез, который находится в окрестностях станции Академик Вернадский, содержится вывод о быстрой реакции островных ледников на атмосферное потепление (Говоруха, 1997, Тимофеев и др., 2005). Немаловажно, что эти исследования могут считаться продолжением работ английских гляциологов в 1960-х гг. (Thomas, 1963), хотя из-за большого временного промежутка совместить ряды наблюдений затруднительно. Кроме того, пробы льда ледника о. Галиндез позволили восстановить состав атмосферного воздуха последних сотен лет (Белявский и др., 2001).

Цель работы – изучить условия формирования баланса массы ледника о. Галиндез по данным метеорологических измерений ст. Академик Вернадский, изучить типы атмосферной циркуляции, влияющие на составляющие баланса массы последних лет, которые были характерны резкими колебаниями. Также ставится задача выяснить различия метеорологических условий соседних климатических зон Антарктического полуострова,

влияющих на режим оледенения.

2. Исходные данные и физико-географическое описание

Использовались данные среднегодовой и месячной температуры воздуха на станциях с наиболее длительным рядом измерений: Оркадас (60°45' ю.ш., 44°43' з.д.) и Академик Вернадский (65°14' ю.ш., 64°15' з.д.) за период 1951–2009 гг., Беллинсгаузен (62°12' ю.ш., 58°58' з.д.) за период 1968–2009 гг.; Эсперанца (63°24' ю.ш., 56°59' з.д.) за период 1952–2009 гг.; а также Марамбио (64,2° ю.ш., 56,7° з.д.), ст. Розера (67°34' ю.ш., 68°08' з.д.) за 1971–2009 гг., базы данных READER (<http://www.antarctica.ac.uk/met/READER/surface>).

Ряд среднемесячной и среднегодовой температуры воздуха ст. Беллинсгаузен (1968–2009 гг.) был дополнен данными ст. Десепшен, 1951–1967 гг. с соответствующими постоянными поправками, как рекомендовано в базе данных READER. Значения средней температуры 1951 г. на Эсперанца восстановлены путем линейной аппроксимации по традиционному в климатологии методу разностей температуры воздуха между соседними станциями Оркадас и Беллинсгаузен.

Станции расположены в разных физико-географических условиях: Академик Вернадский – у западного берега Антарктического п-ва, вблизи горной системы (максимальная высота около 2000 м); Беллинсгаузен и Оркадас – на крупных островах вдали от горных хребтов; Эсперанца – у северной оконечности Антарктического п-ва, в районе оазиса Хоуп-Бей (преобладающие высоты не более 400–600 м). Станция Марамбио находится на о. Seymour в северо-восточной части Антарктического полуострова в окружении шельфового ледника Ларсена, ст. Розера – в восточной части береговой зоны о. Аделаиды.

Кроме того, использовались данные месячных и годовых сумм осадков, а также средней суточной, минимальной и максимальной температур воздуха станции Академик Вернадский. Анализ снегонакопления велся как по данным двух стандартных снегомерных реек на метеоплощадке станции, так и по данным балансовых измерений поверхности островного ледникового купола о. Галиндез. Использовались 30 основных реек и 14 дополнительных на склонах ледника. Плотность снега измерялась стандартным снегомером.

Для исследования атмосферной циркуляции использовались поля геопотенциала реанализа Центра прогноза окружающей среды и Центра атмосферных исследований США (NCEP-NCAR), шаг географической сетки 2,5° (<http://www.cdc.noaa.gov>).

3. Состояние климата Антарктического полуострова

Проанализируем общую тенденцию климата региона по данным среднегодовой температуры воздуха на перечисленных станциях. Многолетний рост среднегодовой температуры воздуха отмечается на станциях, расположенных в разных физико-географических условиях. На станциях Беллинсгаузен, Академик Вернадский и Эсперанца наиболее холодным было десятилетие 1951–1960, а на станции Оркадас – 1966–1975 гг. (рис. 1), при этом в 1971–1975 гг. положительная аномалия среднегодовой температуры воздуха на ст. Академик Вернадский контрастирует с отрицательными аномалиями на других станциях. С начала 1980-х гг. отмечается рост температур на всех станциях (фаза современного потепления), с некоторым ослаблением в 1991–1995 гг. Наиболее теплое полное пятилетие на станциях Антарктического п-ва – 1996–2000 гг., причем на ст. Вернадский в 2006–2009 гг. подобная аномалия повторилась. На остальных станциях Антарктического п-ва после 2000 г. накопленные аномалии средней годовой температуры воздуха несколько ослабевают, оставаясь выше нормы 1961–1990 гг. Наибольшее убывание положительной аномалии в течение 1996–2009 гг. отмечено на ст. Эсперанца.

Таким образом, по абсолютной величине аномалий наибольшее возрастание средней годовой температуры произошло на ст. Вернадский, причем уровень превышения многолетней нормы сохраняется в 2001–2009 гг. Выясним характер многолетнего изменения важнейших показателей гляциального климата по данным станции Академик Вернадский с 1947 г. – средней, минимальной, максимальной температур воздуха сезона абляции. Продолжительность периода абляции (с преобладанием положительной среднесуточной температуры воздуха) увеличивается со временем, отражая процесс регионального

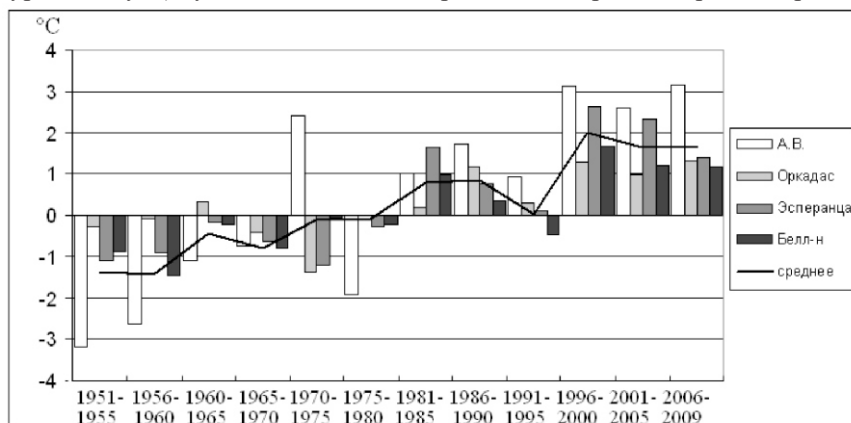


Рис. 1. Накопленные аномалии средней годовой температуры воздуха, осредненной по пятилетиям, в течение 1951–2009 гг. Последнее пятилетие неполное (2006–2009 гг.).

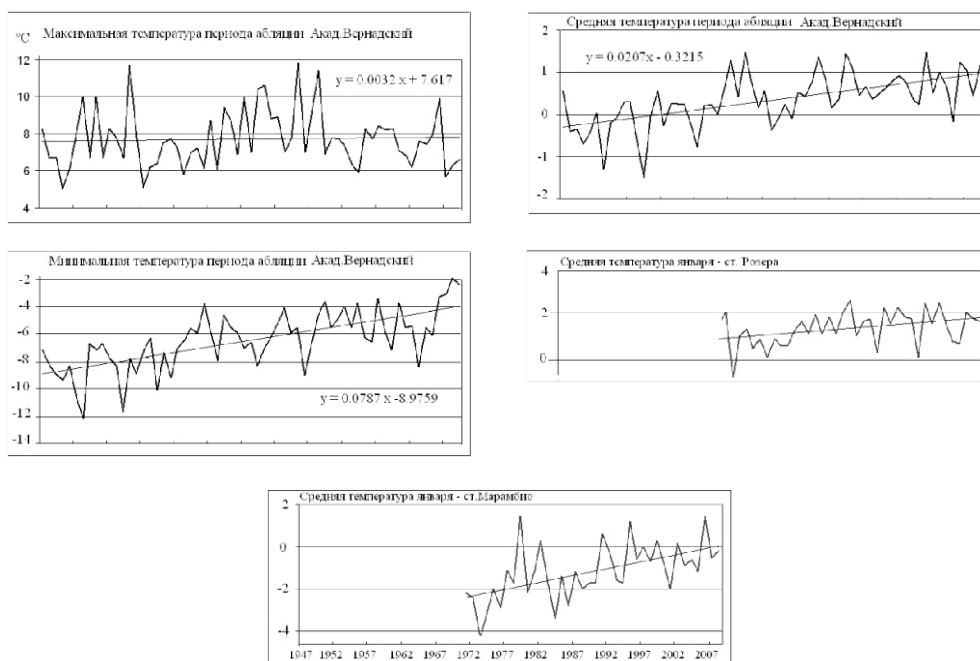


Рис. 2. Средняя, максимальная и минимальная температуры воздуха периода абляции, ст. Академик Вернадский, 1947–2009 гг., а также средняя температура января, ст. Марамбио и Розера, 1971–2009 гг.

потепления. Минимальная продолжительность периода абляции отмечена в 1951–1960 гг., около 2 мес. (январь–февраль), максимальная – после 1990 г., до 3,5–4 месяцев (декабрь–март).

Средняя месячная и минимальная температуры воздуха периода абляции имеют статистически значимый тренд (на 95% уровне значимости), а максимальная температура изменяется слабо (коэффициент тренда 0,0032), рис. 2. Ход средней температуры периода абляции показывает несколько переходов через нулевую отметку, будучи в основном ниже нуля до конца 1960-х гг. и в течение короткого периода 1976–1980 гг. и выше нуля в 1971–1975 гг., а также в течение эпохи современного потепления с начала 1980-х гг. Наибольший многолетний рост отмечен в ходе минимальной температуры (коэффициент тренда 0,072), причем в течение последних 4-х сезонов абляции она превышает отметку -5°C . Таким образом, отличительной особенностью изменения средней температуры воздуха периода летней абляции 1947–2009 гг. становится ее переход к положительным значениям. Годовая амплитуда температуры воздуха при этом сокращается, в основном за счет роста минимальной температуры.

Таким образом, анализ данных температуры периода абляции позволяет восстановить общие условия динамики баланса массы поверхности ледников островного района ст. Вернадский: с 1947 до конца 1960 гг. существовали благоприятные условия для аккумуляции, а с конца 1960-х гг. – для абляции.

Поскольку рассматриваемый район характеризуется крайне неоднородной орографией, проводится сравнение с данными других станций – Марамбио и Розера. В отсутствие данных экстремальных температур используется температура центрального месяца лета – января, аналогично средней температуре периода абляции на ст. Вернадский. Как и на большинстве станций региона, на обеих станциях средняя месячная температура января возрастает с 1971 г., причем наиболее холодные условия в январе отмечаются на ст. Марамбио (рис. 2). Несмотря на то, что эта станция расположена севернее (ближе к экватору), чем ст. Вернадский и Розера, только к концу рассматриваемого периода намечается переход через 0. В то же время средняя температура января на ст. Розера в течение 1971–2009 гг. положительна. Таким образом, в январе – центральном месяце периода абляции при преобладающих отрицательных температурах на ст. Марамбио следует ожидать значительного отличия режима осадков с меньшей долей жидкой фазы, чем на ст. Вернадский и Розера, и, значит, в этом районе летняя абляция значительно меньше по величине. Отмечается также уменьшение градиента температуры между станциями Академик Вернадский и Марамбио: от 2°C в 1971–1980 гг. до 1°C в 2002–2007 гг.

4. Баланс массы на куполе ледника о. Галиндез и толщина снежного покрова

Снегомерный полигон обустроен на леднике о. Галиндез (его рабочее название – Домашний дал проф. Л.С. Говоруха, основатель полигона), на удалении около 1 км к востоку от станции Академик Вернадский. Измерения, начатые в 1996 г., продолжаются практически без перерыва (пропущен только сезон 1997/98 года). Полигонный метод измерения позволяет учесть случайные ошибки измерений по отдельно стоящим рейкам, а также скорректировать эквивалент атмосферных осадков, точность измерений которых в данном районе очень чувствительна к их фазе, а также к ветровым условиям.

Для каждого сезона рассчитывались основные показатели поверхностного баланса массы – аккумуляция, абляция, годовой баланс, а также максимальное снегонакопление, плотность снега (см. таблицу). Некоторые расчетные величины уточнены по сравнению с (Тимофеев и др., 2005). Отличительные характеристики измерений последних лет – значительные межгодовые колебания составляющих баланса массы, а также преобладание аккумуляции после 2001 г. (таблица), хотя общий баланс массы остается отрицательным. Аккумуляция отмечена в сезонах 2001/02 г. (+133 мм), 2004/05 г. (+38 мм), 2005/06 (+15 мм) и

В.Е. Тимофеев: ВЛИЯНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ...

2007-08 гг. (+7 мм). В 2006-2007 гг. отмечена абляция (-97 см), и в следующем сезоне 2007-2008 гг. – незначительная аккумуляция (+7 мм). Такие изменения связаны с особенностями метеорологического режима последних лет: прекращение тенденции к потеплению привело к

Таблица

**Результаты массбалансовых наблюдений на куполе Домашний (о. Галиндез),
1996–2007 гг.**

Период аккумуляции, сумма дней	Максимальное снегонакопление, дата, средняя толщина (h_{cp}), плотность снега, г/см ³	Зимняя аккумуляция (мм)	Период летней абляции	Летняя абляция (мм)	Годовой баланс, (мм)
1.03–27.10.1996 240 дней	27.10.1996 $h_{cp} = 150$ см $\rho = 0.40$	+600	28.10.96–30.03.97 154 дня	-800	-200
21.04–09.11.1999 202 дня	31.10.1999 $h_{cp} = 117$ см $\rho = 0.46$	+538	10.11.99–05.03.2000 115 дней	-439	+99
25.03–21.10.2000 210 дней	21.10.2000 $h_{cp} = 105$ см	+441	1.11.2000–31.01.2001 92 дня	-437	+4
09.03–30.11.2002 263 дня	01.12.2002 $h_{cp} = 131$ см $\rho = 0.45$	+590	02.12.01–19.03.2002 107 дней	-457	+133
18.03–30.11.2003 252 дня	30.12.2003 $h_{cp} = 128$ см $\rho = 0.42$	+378	31.12.03–14.03.04 73 дня	-574	-196
15.04–10.11.2004 209 дней	10.11.2004 $h_{cp} = 154$ см $\rho = 0.44$	+623	11.11.04–21.02.2005 102 дня	-585	+38
15.03–12.11.2005 241 день	08.10.2005 $h_{cp} = 251$ см $\rho = 0.41$	+136	13.11.2005–05.02.2006 114 дней	-121	+15
09.03–12.10.2006 216 дней	31.10.2006 $h_{cp} = 156$ см $\rho = 0.38$	+134	10.11.2006–12.03.2007 152 дня	-230	-96
18.03–23.10.2007 219 дней	07.10.2007 $h_{cp} = 180$ см $\rho = 0.40$	+142	17.11.2007–06.03.2008 139 дней	-135	+7

Примечание: h_{cp} – средняя высота снега на полигоне по 30 рейкам; ρ – плотность снега.

более длительному сохранению снежной массы на поверхности ледника и ее уплотнению к концу сезона аккумуляции.

Кроме того, в последние годы несколько раз снизились значения составляющих годового баланса массы поверхности ледника: в 2005–2007 гг. приходная часть (аккумуляция) не превышала +136 мм, а расходная (абляция) - 230 мм, в то время как в 2004 г. максимум аккумуляции составил +623, а абляции - 585 мм. Одновременно несколько увеличилась продолжительность сезона аккумуляции в последние годы, с максимумом в 2002 – 263 дня и в 2005 г. – 241 день. Даже в течение года со значительной абляцией (2006-й) аккумуляция длилась 216 дней. Эти изменения, очевидно, связаны с особенностями атмосферной циркуляции, о которых речь пойдет далее.

Поскольку в конце летнего сезона (абляции) массбалансовые измерения в большинстве лет не проводятся из-за вытаивания рек на полигоне, для анализа снегонакопления в феврале–апреле привлекаются данные измерений снежного покрова на метеорологической площадке ст. Вернадский. Аналогично данным снегомерного полигона, значительные межгодовые колебания – отличительная особенность толщины снежного покрова в последние годы (2000–2006), причем наибольшие различия отмечены между летними и осенними месяцами (январь–апрель) разных лет, до 100–120 см (рис. 3). В течение ряда летних сезонов, например, в 2002 и 2005 гг., создаются благоприятные условия для сохранения снежного

покрова с годовым минимумом более 100 см, хотя в предшествующие годы минимум толщины снега был меньше 30 см, а в 2001, 2003 и 2004 гг. наблюдалось практически полное стаивание снежного покрова. В 2005 г. отмечен максимум толщины снежного покрова за годы украинской антарктической экспедиции (254 см). С конца апреля начинается рост толщины снежного покрова, в зависимости от количества осадков, выпадающих в холодное полугодие в твердой фазе.

Таким образом, в течение периода летней абляции выделены три типа режимов толщины снежного покрова: 1) высокий – более 100 см (2002 и 2005 гг.); 2) средний – 30–100 см (1997, 2000, 2006 гг.); 3) низкий – 0–30 см (1998, 2001, 2003, 2004 и 2007 гг.).

Дальнейший анализ позволит детальнее прояснить зависимость процессов

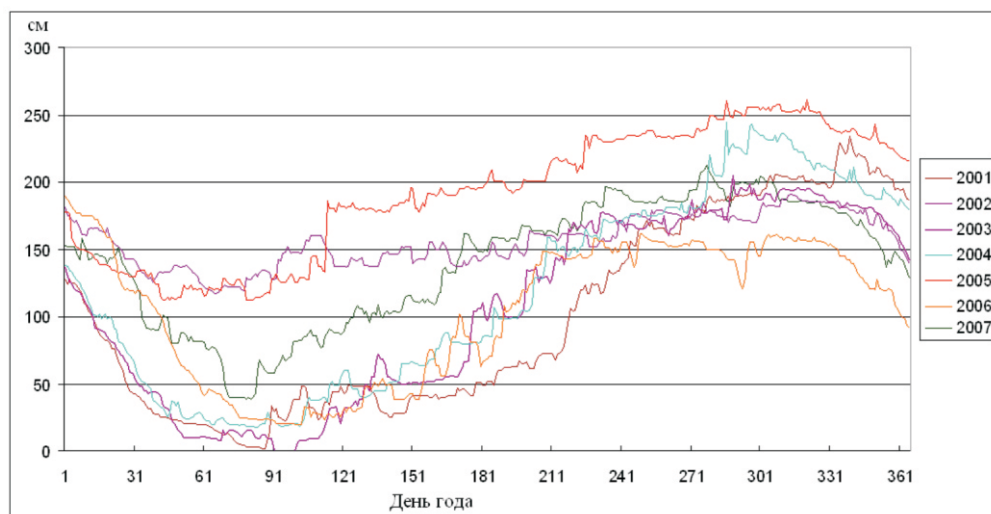


Рис. 3. Внутригодовой ход толщины снежного покрова (пятидневные скользящие средние), станция Академик Вернадский, 2000–2006 гг.

аккумуляции–абляции, в особенности их значительные межгодовые колебания, от метеорологических условий, включая роль атмосферных осадков. В связи со спецификой измерений на станции Вернадский не удастся разделить количество жидких и твердых осадков, однако имеются данные о количестве дней с таковыми.

Для примера взяты 2005 и 2006 гг. с различными условиями снегонакопления и метеорологического режима на ст. Академик Вернадский. В 2005 г. отрицательная аномалия температуры воздуха преобладала в январе, марте–августе, что способствовало росту снежного покрова со второй половины марта, несмотря на количество осадков ниже нормы (не более 50 мм), рис. 4. Наибольшее убывание толщины снежного покрова происходило от января к февралю, когда средняя температура воздуха февраля была несколько выше нуля, а доля осадков жидкой фазы составила 46%. В марте, при преобладающей отрицательной температуре воздуха, существенных изменений не наблюдается, а в апреле–мае при преобладании осадков твердой фазы (90% дней) начинается аккумуляция, которая продолжается вплоть до ноября. Доля жидких осадков во второй половине года не превышает 9%.

В 2006 г. преобладала положительная аномалия температуры воздуха практически во все месяцы, кроме января (в августе и ноябре немного выше нормы), и при большом количестве осадков. В феврале–марте 2006 г. осадки жидкой фазы выпадали в течение большей части времени (50% дней в феврале и 71% в марте), при положительных температурах. Это привело к

значительному стаиванию снежного покрова, причем разность между апрелем 2006 и 2005 гг. достигает 120 мм. Абляция происходит и в апреле, на фоне положительной аномалии температуры воздуха. Снегонакопление начинается только с мая, и в течение холодного периода происходит прирост снежного покрова, сравнимый с 2005 г., – на 120–130 см. При этом отмечено два максимума толщины снежного покрова – а августе и ноябре, а в октябре отмечено некоторое уменьшение, в связи с положительной аномалией температуры и значительной долей осадков жидкой фазы (29%). Отметим также, что в течение обоих лет просматривается годовой ход осадков, характерный для данного региона, с основным максимумом в феврале-марте и вторичным – в октябре.

Поскольку проанализированные годы являются типичными для остальных лет выше выделенных режимов снежного покрова, при оценке годового снегонакопления (или, применительно к снегомерному полигону, оценке баланса массы ледника) решающим является величина летней абляции и преобладающая фаза выпадающих осадков (в поддержку выводов (Тимофеев и др., 2005)). В свою очередь, последние зависят от аномалии средней

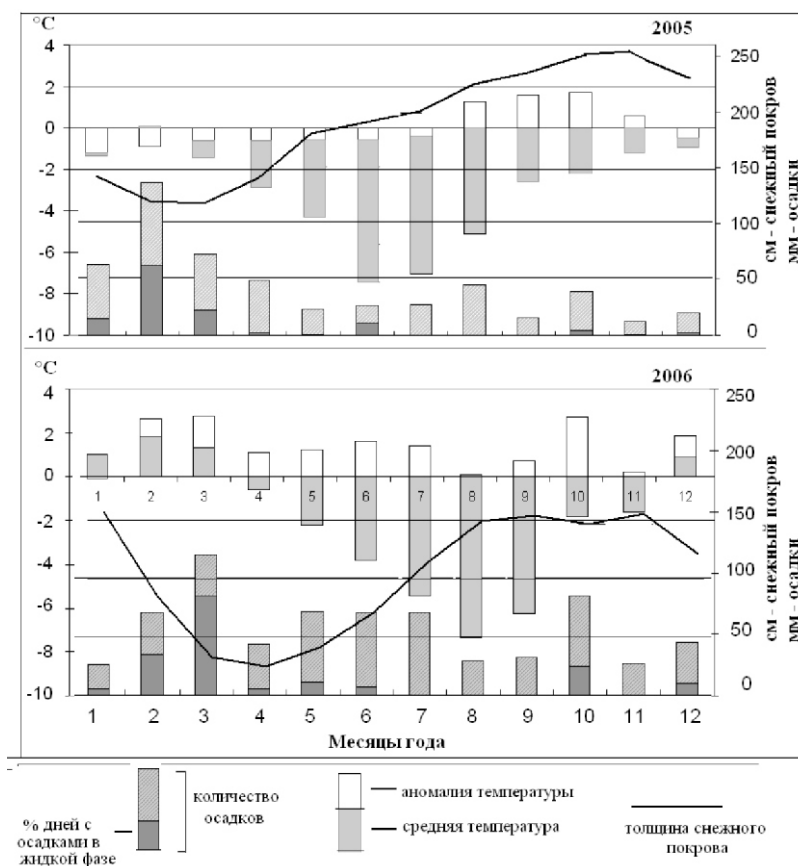


Рис. 4. Средняя месячная температура и ее аномалия. Левая шкала – °С, толщина снежного покрова на последний день месяца (см), месячное количество осадков (мм) и процент осадков жидкой фазы – правая шкала, по данным ст. Вернадский, 2005 (верхний график) и 2006 гг. (нижний график). На обоих графиках: верхняя ось X – температура воздуха и ее аномалия (по отношению к стандартному климатическому периоду 1961–1990 гг.); нижняя ось X – количество осадков, доля количества с осадками жидкой фазы и толщина снежного покрова.

месячной температуры воздуха, которая определяется типом преобладающей циркуляции атмосферы.

5. Циркуляция атмосферы западного сектора Антарктики

Для выяснения причин формирования аномалий баланса массы поверхности ледника о. Галиндез, а также аномалий снежного покрова по материалам станции Академик Вернадский отобраны отдельные годы с годовой аккумуляцией (2002, 2004 и 2005) и летней абляцией (1996, 1999, 2003, 2006 и 2007). В первую очередь нас интересовал переходный период между окончанием периода абляции – началом аккумуляции (март–май), а также условия прироста снежной массы в течение зимы. Атмосферная циркуляция исследовалась путем анализа месячных и сезонных аномалий геопотенциала нижней тропосферы с марта по август, в годы с однородными условиями снегонакопления. Наилучшим образом очаги аномалий просматриваются на уровне АТ-700 гПа (ведущего потока). Так, в течение первой половины лет с наименьшей летней абляцией и отрицательной аномалией температуры воздуха на ст. Академик Вернадский (2002, 2004 и 2005 гг.) в Тихоокеанском секторе располагался очаг положительных аномалий геопотенциала в западном секторе ЮПО, вплоть до 70° ю.ш., возникающих за счет преобладания антициклогенеза и создающих блокирующий эффект, из-за которого траектории циклонов сдвигаются к побережью континента. Антарктический п-в находится в пограничной зоне гребня тихоокеанского максимума и тыловых частей циклонов в море Уэдделла (рис. 5). Такая ситуация привела к отрицательным аномалиям месячной температуры воздуха на ст. Академик Вернадский и осадкам в пределах нормы. В течение зимних месяцев очаг положительных аномалий геопотенциала в Тихоокеанском секторе несколько активизируется (аномалия в центре до

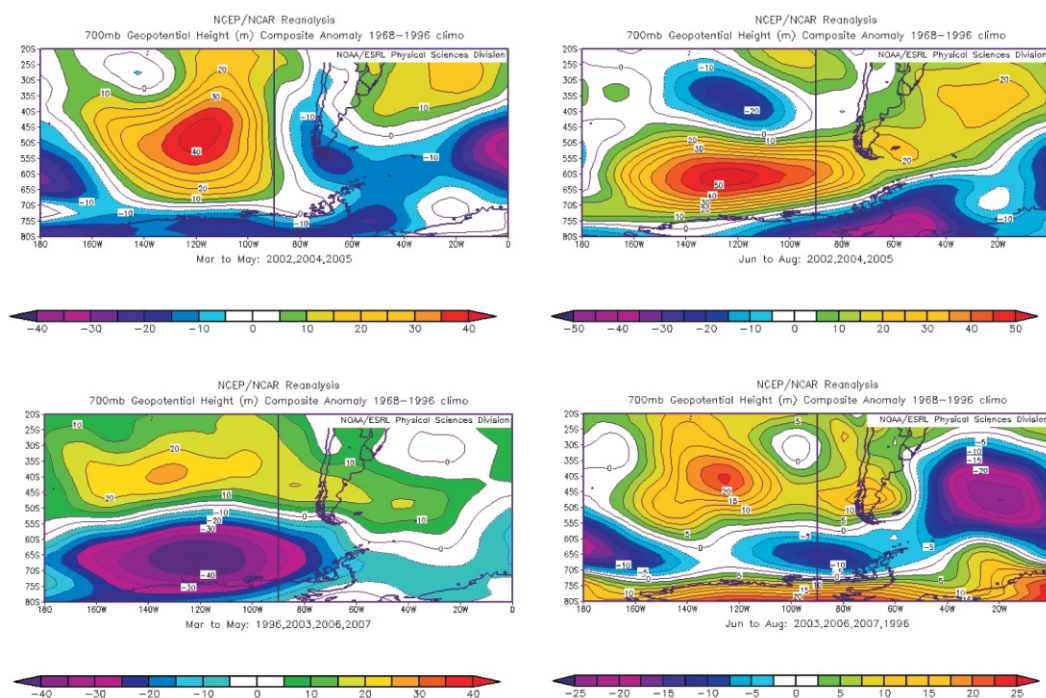


Рис. 5. Аномалия геопотенциала АТ-700 гПа: март–май, июнь–август, 2002, 2003 и 2005 гг. (годы аккумуляции), и 1996, 2003, 2006 и 2007 гг. (годы абляции).

50 гп.дам), практически остается на своем месте, вытягиваясь на восток и соединяясь с гребнем Южноатлантического максимума. Это обусловило преобладающий ЮЮЗ перенос в район Антарктического п-ва, отрицательные аномалии месячной температуры воздуха, что вместе с выпадающими твердыми осадками привело к значительной аккумуляции, особенно в 2005 г.

Анализ пространственных аномалий геопотенциала АТ-700 гПа в годы с интенсивной летней абляцией показал, что в Тихоокеанском секторе ЮПО преобладает очаг отрицательных аномалий (циклогенез) в марте–августе (аномалия в центре до - 40 гп.дам), причем он смещается на восток от осени к зиме, с центром севернее моря Уэдделла (рис. 5). При этом область положительных аномалий (антициклон) локализована в тропических и умеренных широтах Тихоокеанского сектора, с отдельным центром над крайним югом Южной Америки. В результате усиливается зональный поток в западном секторе, с усилением ЗСЗ переноса к Антарктическому п-ву, что приводит к преобладанию абляции как за счет усиления ветра, так и в результате выпадения жидких осадков при повышении температуры воздуха выше нуля. Положение зон циклогенеза в эти годы в целом подобно тому, что наблюдается на полях давления наиболее вероятных процессов теплых зим 1990-х гг. (Мартазинова и др., 2007). Усиление циклоничности в месяцы теплого полугодия приводит к значительной абляции из-за выпадения осадков преимущественно смешанной и жидкой фаз, в то же время в месяцы холодного полугодия при преобладающих отрицательных температурах интенсивный циклогенез приводит к аккумуляции.

Вместе с тем в отдельные годы отмечается большая степень меридионального преобразования за счет продвижения гребней субтропических максимумов, прежде всего в Тихоокеанском секторе. При этом отмечается большая устойчивость форм атмосферной циркуляции в годы с преобладающим антициклогенезом, со смещением к востоку очагов преобладающих аномалий геопотенциала между сезонами. Найденная закономерность должна быть проверена на более представительном ряде лет, но учитывая ранее проведенные исследования (Turner, 2004, Trenberth et al., 1996), следует отметить, что формирование аномалий в полях давления или геопотенциала в Тихоокеанском секторе рассмотренных лет зависит от преобладающей фазы явления Эль-Ниньо.

6. Дискуссия

Данные баланса массы ледника о. Галиндез отражают изменение в рассматриваемом районе погодных условий, для которых характерна значительная межгодовая изменчивость. Если в течение первых десятилетий периода инструментальных измерений преобладали отрицательные температуры во время сезона абляции, то преобладание с 1971 г. положительной температуры привело к деградации ледника, достигшей максимума в 1996–2000 гг. В 1996 г., первом сезоне измерений на снегомерном полигоне, отмечена значительная абляция, что стало следствием усиленной циклоничности в море Беллинсгаузена и адвекции теплого воздуха со значительным количеством осадков. В дальнейшем выявлен ряд лет, подобных по характеристикам баланса массы и типа атмосферной циркуляции. В зависимости от преобладающего типа циркуляции отмечаются большие межгодовые колебания как составляющих баланса массы ледника, так и толщины снежного покрова на ст. Академик Вернадский.

С другой стороны, в течение последних лет при адвекции прохладной ВМ в области повышенного давления в юго-восточном секторе Тихого океана преобладает положительный баланс массы, формирующей отрицательные аномалии температуры воздуха у западного побережья Земли Грейама. В эти годы отмечается большая устойчивость областей повышенного давления в Тихоокеанском и Атлантическом секторах ЮПО.

Сопоставление поля аномалий геопотенциала в годы с разными показателями баланса

массы (рис. 5) с данными о динамике явления Эль-Ниньо свидетельствует о том, что положительная аномалия геопотенциала в 2002, 2005 гг. (антициклогенез) развивается в Тихоокеанском секторе в течение теплой фазы Эль-Ниньо, а преобладание полей пониженного давления 2003, 2006 и 2007 гг. соответствует холодной фазе (Ла-Нинья). Данный вывод сопоставим с выводами (Turner, 2004).

Соответственно, положительные аномалии температуры воздуха и количество осадков выше нормы и по данным ст. Вернадский наблюдаются на фоне холодной фазы Эль-Ниньо, а отрицательные аномалии с осадками в пределах и ниже нормы – на фоне положительной фазы Эль-Ниньо. Учитывая данные баланса массы поверхности ледника о. Галиндез, можно отметить, что абляция наступает при переходе индекса к положительным значениям, а аккумуляция – к отрицательным.

На момент выхода статьи (конец 2010 г.) известно, что на фоне активизации холодной фазы (Ла-Нинья) усилился циклогенез в Тихоокеанском секторе, с чем были связаны и положительные аномалии среднемесячной температуры воздуха месяцев второй половины года, и значительные месячные суммы осадков на ст. Академик Вернадский. Таким образом, описанные ранее в литературе закономерности развития атмосферных аномалий в годы Ла-Нинья подтверждены в данной работе.

Однако, поскольку Антарктический п-ов расположен в пограничном районе влияния центров действия, эволюционирующих под влиянием Эль-Ниньо, локализация барических систем в рамках отдельной фазы Эль-Ниньо может различаться. В особенности это относится к взаимодействию субтропических гребней и депрессий Южного океана в Тихоокеанском и Атлантическом бассейнах.

Ожидается, что процесс деградации островных ледников продолжится в течение некоторого времени в связи с превышением пороговых значений температур, обеспечивавших равновесие аккумуляции–абляции (Smith et al., 2007), в первую очередь шельфовых ледников у западного побережья Антарктического п-ва, в районе станций Академик Вернадский и Розера. Что касается покровного оледенения Антарктического п-ва, то в связи с отсутствием регулярных данных выводов о его многолетней динамике нет. В первых украинских экспедициях полевые исследования проводили на ледниках полуострова авторы статьи, проф. Л.С. Говоруха и С.И. Гордиенко, причем было показано наличие градиентов температуры между береговой зоной и близлежащими островами (Говоруха, 1997). Обширный покровный ледник формирует собственный климат с очагом холода над ним, и вполне вероятно, что условия его питания, особенно летнего, отличаются от условий рассмотренного ледника о. Галиндез. Данные станции Марамбио, находящейся севернее ст. Вернадский, показали, что средняя температура центрального месяца лета была ниже нуля в 1971–2009 гг.

Если предположить, с учетом представленных выше данных, что средняя температура периода абляции над поверхностью покровного оледенения Антарктического п-ва на широте украинской станции меньше по крайней мере на 1 °С, чем по данным ст. Вернадский, то можно утверждать, что период абляции на полуострове значительно менее продолжителен, с преобладанием осадков твердой фазы, а это значит, что существуют условия для общей аккумуляции во время фазы современного потепления.

В поддержку этого отметим замечания (Голубев, 1998), что в эпоху потепления сокращение оледенения происходит за счет уменьшения или исчезновения мелких ледников, в то время как крупные покровные ледники находятся в квазистационарном состоянии или даже увеличивают свою площадь. Аналогичный процесс может происходить на Земле Грейама, когда рост осадков теплого полугодия приведет к аккумуляции покровного оледенения за счет более низкого температурного фона по сравнению с малым островным ледником. Однако для этого необходимы дальнейшие исследования с выходом на полуостров и установкой автоматической метеостанции.

7. Выводы

1. По данным рядов температур ст. Вернадский восстановлены общие условия эволюции локального оледенения начиная с 1947 г. До конца 1960-х гг. существовали условия, благоприятные для годовой аккумуляции, а после 1970 г. – для абляции малого ледника береговой зоны. В течение наиболее теплого пятилетия 1996–2000 гг. в истории наблюдений в районе Антарктического п-ва произошла значительная абляция поверхности ледникового купола о. Галиндез, которой, в первую очередь, способствовало увеличение продолжительности периода абляции из-за преобладания положительных температур в летний сезон.

2. В последние годы (2001–2007) наметилась тенденция к замедлению роста средней годовой температуры воздуха на большинстве станций региона, которая, тем не менее, остается выше норм, рассчитанных для климатических периодов второй половины XX в. Соответственно, в 2001–2007 гг. баланс массы ледника о. Галиндез несколько изменился: на фоне значительных межгодовых колебаний последовали снижение летней абляции и рост зимней аккумуляции. Выявлена ведущая роль летней абляции в общем годовом балансе: она вносит основной вклад в суммарную годовую аномалию снегонакопления в зависимости от знака аномалии средней температуры месяцев теплого периода.

3. Усиление циклоничности в месяцы теплого полугодия приводит к значительной абляции из-за выпадения осадков преимущественно в смешанной и жидкой фазе, в то же время циклогенез в месяцы холодного полугодия при преобладающих отрицательных температурах приводит к аккумуляции. Большая устойчивость форм антициклонической циркуляции приводит к продолжительному сохранению знаков аномалий атмосферного давления или геопотенциала (от месяца до полугодия), что в свою очередь ведет к меньшей абляции на леднике о. Галиндез.

4. Приведенные данные баланса массы островного ледника могут не быть представительными для покровного и шельфового оледенения Земли Грейама в связи с формированием над ним собственного климата. Данные отдельных станций показывают, что в этих районах формируется иной режим оледенения, со значительно меньшей величиной летней абляции. Для уточнения региональных особенностей необходимы дальнейшие исследования с проведением полевых работ на полуострове и установкой автоматических метеостанций.

5. Гляциоклиматические условия в исследуемом районе, в том числе на станции Академик Вернадский, находятся в большой зависимости от фазы явления Эль-Ниньо, с которым связано развитие определенных форм циркуляции в Тихоокеанском секторе ЮПО. Однако в связи с разнообразием атмосферных откликов на каждое событие Эль-Ниньо можно указать лишь основной процесс, связанный с той или иной фазой явления. Кроме того, Антарктический полуостров расположен у границы влияния ЦДА. Для поиска более надежных связей между региональным климатом и явлением Эль-Ниньо и необходимы дальнейшие исследования.

Литература

Белявский А.В., Богилло В.И., Гожик П.Ф., Грищенко В.Ф. Предварительные результаты проб льда, отобранных в ходе 1-й и 2-й Украинских антарктических морских экспедиций. 1997-1998 гг. Материалы гляциологических исслед., Москва, 2001. – С. 116–120.

Голубев В.Н. Современные колебания ледникового купола Вавилова на Северной Земле

В.Е. Тимофеев: ВЛИЯНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ...

// Материалы гляциологических исслед. М., 1998. – 85. – С.196–204.

Говоруха Л.С. Гляциоклиматологическая характеристика Земли Грейама // Бюлл. Укр. Антарк. центра. – 1998. – Вып. 1. – С. 5–9.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. Крупномасштабные колебания циркуляции атмосферы в Южном полушарии и их влияние на изменение климата некоторых регионов Земного шара в XX веке // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 5–17.

Захаров В.Г., Хмелевская Л.В. Гляциоклиматические характеристики антарктических ледников – отражение общепланетарных атмосферных процессов // Материалы гляциологических исслед., 1990, вып. 70. – С. 23–29.

Золотарев Е.А., Алейников А.А., Харьковец Е.Г. Сокращение оледенения Эльбруса в XX столетии. М., Мат. Гляциол. Исслед, 2005, 98. – С. 162–166.

Зотиков И.А. Озеро Восток, Антарктида (гляциологический, биологический, планетологический аспекты). Москва, Материалы гляциологических исслед, 1998, N 85. – С. 137–145.

Мавлюдов Б.Р. Состояние оледенения Шпицбергена в конце XX века // Материалы гляциологических исслед., 2006, 101. – С. 146–152.

Мартазинова В.Ф., Тимофеев В.Е., Иванова Е.К. Состояние циркуляции нижней тропосферы Южной полярной области в период современного потепления. Укр. Антаркт. Журнал, 2007/08, N 6-7. – С.175–181.

Режим и эволюция полярных ледниковых покровов // Под. ред. В.М. Котлякова. СПб: Гидрометеоздат, 1992. – 232 с.

Рыбак О.О. Математические модели континентальных ледниковых щитов. 1. Архитектура моделей // Криосфера Земли, 2008, том XII, N 1. – С.12–23.

Тимофеев В.Е., Грищенко В.Ф. Реакции компонентов гляциосферы на изменение климата в районе Антарктического п-ова // Укр. Ант. Журнал, 2005. Вып. 3. С. 100–107.

Kerr A. W.-B., Fitzsimons S. Climate sensitivity of a high-precipitation glacier in New Zealand // Journal of Glaciology Volume 56(195), 2010. – P. 114–128.

Blunier, T., R. Spahni, J.-M. Barnola, J. Chappellaz, L. Loulergue, J. Schwander. Synchronization of ice core records via atmospheric gases // Climate of the past 2007, 3. – P. 325–330.

Delmonte, B., P.S. Andersson, M. Hansson, H. Schoberg, J.R. Petit, I. Basile-Doelsch, V. Maggi, Aeolian dust in East Antarctica (EPICA-Dome C and Vostok): Provenance during glacial ages over the last 800 kyr // Geophysical Research Letters 2008. – 35, L07703, doi:10.1029/2008GL033382.

Eisen, O., W. Rack, U. Nixdorf, F. Wilhelms. Characteristics of accumulation around the EPICA deep-drilling site in Dronning Maud Land, Antarctica // Annals of Glaciology 2005. – 41(1). – P. 41–46.

Kejna M., Laska K., Caputa Z. Recession of the Ecology Glacier (King George Island) in the period 1961–1996. Plosh Polar Studies, 1998, 25th Int. Polar Synposium, 1998. – 121–128.

Orheim O., Govorukha L.S. Present - day glaciation in South Shetland Islands // Annals of Glaciology, Cambridge, England; Columbus, Ohio. J.G. Society. 1982, vol. 3, p. 233–238.

Hinzman, L., Bettez N., Bolton W.R et al. Evidence and implications of recent climate change in Northern Alaska and other Arctic regions // Climate Change. 2005. N 72. P. 251–298.

Ingolfsson O., Hjort C. Glacial history of the Antarctic Peninsula since the Last Glacial Maximum – a synthesis // Polar Research. 2002. N 21(2). P. 227–234.

Eric P. Kelsey, C.P. Wake, K. Kreutz, E. Ostenberg. Ice layers as an indicator of summer warmth and atmospheric blocking in Alaska // Journal of Glaciology. 2010, Vol. 56(198). – P. 715–722.

Petit J., Schwander B., Stenni E., W. Wolff. Stratigraphic correlations between the EPICA-Dome C and Vostok ice cores showing the relative variations of snow accumulation over the past 45 kyr // Journal of Geophysical Research 2004, 109, D08101, doi: 10.1029/2003JD004180.

В.Е. Тимофеев: ВЛИЯНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ...

Rotschky, G., P. Holmlund, E. Isaksson, R. Mulvaney, H. Oerter, M.R. van den Broeke, J.-G. Winther. A new surface accumulation map for western Dronning Maud Land, Antarctica, from interpolation of point measurements // *Journal of Glaciology* 200753 (182), 385–398.

Skvarza P.W., Pack W., Rott H., Donangelo Y. Climatic trend and the retreat and disintegration of ice shelves on the Antarctic Peninsula // *Polar Res.*, 1999, 18 (2), 151–157.

Smith J.A., Bentley M.J., Hodgson D.A., Cook A.J. George VI Ice Shelf: past history, present behavior and potential mechanisms for future collapse // *Antarctic Science*. 2007. N 19(1). P. 131–142.

Thomas R.H. Studies on the ice cap of Galindez Island, Argentine Islands // *BAS Bulletin*, 1963. N 2. – P. 27–43.

Turner J. The El Niño-Southern Oscillation and Antarctica // *Int. J. of Climatology*. 2004. Vol. 24. N 1. P. 1–32.

Turner J., Colwell S., Marshall G., Lachlan-Cope T., Carleton A., Jones P., Lagun V., Reid F., Iagovkina S. Antarctic climate during the last 50 years // *Int. J. Climatol*. 2005. Vol. 25. P. 279–294.

Turner J., Haranzogo S., Marshall G., King J., Colwell S. Anomalous atmospheric circulation over the Weddell Sea, Antarctica during the austral summer of 2001/02 resulting in extreme sea ice conditions // *Geoph. Res. Letters*, 2002. – 29(24), N 13. – P. 1–4.

Trenberth K.E., Hoar T. The 1990–1995 El-Niño-Southern Oscillation events: Longest on Record // *Geoph. Res. Letter*. 1996. Vol. 23. P. 57–60.