

ОБ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА В ТРОПОСФЕРЕ НАД АНТАРКТИЧЕСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ

ABOUT CLIMATIC CHANGES OF TROPOSPHERE OVER ANTARCTIC PENINSULA

Олег А. Алдухов¹, Виктор Е. Лагун², Ирина В. Черных¹, Светлана В. Яговкина³

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации
– Мировой центр данных, ул. Королева 6, Обнинск, 249035 Россия
aoa@meteo.ru, civ@meteo.ru

² Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт
ул. Беринга 38, Санкт-Петербург, 199397 Россия
lagun@aari.nw.ru

³ Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
ул. Карбышева 7, Санкт-Петербург, 194021 Россия
svetlana@main.mgo.rssi.ru

Аннотация. В статье предложен метод расчета параметров линейных трендов по результатам срочных наблюдений с учетом их корреляции во времени. Выполнен анализ оценок трендов температуры воздуха на стандартных изобарических поверхностях, полученных различными методами, на основе массивов аэрологических наблюдений CARDS и ААНИИ. Исследования проведены на примере данных радиозондирования атмосферы на российской антарктической станции Беллинсгаузен, расположенной в районе Антарктического полуострова, где за последние десятилетия зафиксировано значительное потепление, как в приземном слое, так и в тропосфере. Результаты показали, что с помощью нового метода возможно получение более надежных оценок трендов метеорологических параметров по сравнению с традиционным подходом к расчету трендов.

Ключевые слова: тренды температуры воздуха, радиозондирование атмосферы, Беллинсгаузен, Антарктический полуостров.

1. Введение

В связи с обнаружением значительного потепления в отдельных регионах планеты и с выраженной тенденцией увеличения числа опасных погодных явлений, приводящих к росту социально-экономического ущерба (Бедрицкий и др. 2003, Шойгу 2003), актуальность количественного исследования климатической изменчивости неуклонно возрастает. Для уточнения оценок наблюдаемых изменений климата необходимо, как создание наиболее полных массивов данных высокого качества, так и разработка методики анализа исторических данных, которые, в силу объективных причин, достаточно часто содержат неоднородные во времени ряды данных наблюдений (Алдухов и др. 2003, Алдухов и др. 1990, Нагурный и др. 2001, Майстрова и др. 2002, Стерин 2004а и б, Alduchov и Eskridge 1996, Eskridge и др. 1995, Seidel и др. 2004, Turner и др.

2004, 2005; Zaitseva 1993). Актуальным является и сопоставление оценок трендов ключевых метеорологических параметров, полученных различными методами на массивах различного происхождения. Особый интерес представляют такие исследования для конкретной станции с выраженной тенденцией потепления в тропосфере.

В данной работе представлены метод расчета трендов по данным срочных наблюдений с учетом их корреляции во времени и анализ оценок трендов температуры на изобарических поверхностях, полученных различными методами, на основе массивов аэрологических наблюдений CARDS (Comprehensive Aerological Reference Data Set), (Alduchov и Esridge 1996, Eskridge и др. 1995, Wallis 1997) и ААНИИ (Jagovkina и Lagun 2004). Исследования проведены на примере российской антарктической станции Беллинсгаузен (62.18° ю.ш., 58.9° з.д.), расположенной на острове Кинг-Джордж (архипелаг Южные Шетландские острова). Значительное потепление в западной части Антарктического полуострова зафиксировано на уровне земли и в тропосфере (King и Harangozo 1998, Marshall и др. 2002, Turner и др. 2004, 2005; Vaughan и Doake 1996). Оно определено как по синоптическим, так и по радиозондовым и спутниковым наблюдениям (Алдухов и др. 2003, Бедрицкий и др. 2003, Черных и Алдухов 2003, Comiso 2000, Jagovkina и др. 2004, Marshall и др. 2002, Turner и др. 2004, 2005) и является наибольшим в Южном полушарии [22]. На станции Фарадей (ныне – Академик Вернадский) за последние пятьдесят лет средняя годовая температура повысилась приблизительно на 2.5°C (Turner и др. 2005). Потепление, отмеченное на станциях, расположенных в западной и северо-восточной частях полуострова (King и Comiso 2003, Marshall и др. 2002), распространяется с уменьшением амплитуды вдоль территории Южной Америки до 45° ю.ш. (Marshall и др. 2002). Величина потепления варьирует в зависимости от района и сезона (Comiso 2000, Marshall и др. 2002, Turner и др. 2004, 2005). Например, на западном побережье Антарктического полуострова, по данным станции Фарадей за период 1951-2000 гг., согласно (Marshall и др. 2002), она составляет $+0.0562 \pm 0.0429^\circ\text{C}/\text{год}$, при этом наибольшее потепление отмечено зимой Южного полушария (июнь-август): $+0.1089 \pm 0.0880^\circ\text{C}/\text{год}$, летом (декабрь-февраль) рост приземной температуры меньше: $+0.0244 \pm 0.0168^\circ\text{C}/\text{год}$. Это потепление качественно согласуется с заметным сокращением шельфового ледового покрова на севере полуострова (Marshall и др. 2002, Vaughan и Doake 1996). Поскольку причины локального процесса потепления окончательно не ясны, использование дополнительной информации, характеризующей это уникальное явление, может помочь в понимании механизма его формирования.

2. Данные

Для исследования атмосферных процессов над Антарктическим полуостровом использованы данные аэрологических наблюдений, содержащиеся в глобальном аэрологическом архиве CARDS и базе данных ААНИИ, которая создается на основе результатов срочных синоптических и аэрологических наблюдений, хранящихся в Госфонде ААНИИ, аэрологического архива АЭРОСТАБ (Алдухов и др. 1990) при поддержке Научного комитета по исследованию Антарктики (проект SCAR READER), (Turner и др. 2004). База данных ААНИИ содержит как полные ряды данных синоптических наблюдений о приземной температуре, так и данные о температуре на стандартных изобарических поверхностях, полученные на основе радиозондирования на российских антарктических станциях с длинными рядами наблюдений. По данным ААНИИ вычислены средние месячные значения температуры воздуха (<http://south.aari.nw.ru>). Результаты аэроло-

гических наблюдений для станции Беллинсгаузен в массиве CARDS собраны за период 1970–1999 гг., а в архиве ААНИИ – за период 1969–1999 гг.

3. Методы вычислений

Для расчета трендов аномалий температуры на уровне подстилающей поверхности и на стандартных изобарических поверхностях использованы два метода: традиционный метод и так называемый «точечный» метод, основанный на использовании срочных данных с учетом их корреляции во времени. Традиционный подход к оценке трендов метеорологических величин базируется на анализе средних месячных и средних годовых значений наблюдаемых значений. Применительно к данным наблюдений, регулярно проводимым на метеорологических станциях, это заведомо имеет определенный смысл, так как каждый анализируемый месяц (год) в таком случае равномерно обеспечен их результатами. Применительно к неоднородным во времени наблюдениям такой подход приводит к необходимости принятия решения о том, какое число наблюдений и какое распределение наблюдений в течение месяца (года) считать приемлемым для получения «надежных» средних месячных (средних годовых) значений (Алдухов и др. 2003, Стерин 2004б). Примерами таких неоднородных данных являются результаты аэрологических наблюдений на больших высотах для большинства аэрологических станций, а также данные метеорологических и аэрологических наблюдений, проводимых в экстремально сложных погодных условиях полярных областей (Алдухов и др. 2003, Нагурный и др. 2001, Майстрова и др. 2002, Turner и др. 2005). Использование «жестких» критериев отбора месяцев (лет) с репрезентативным набором данных наблюдений для соответствующего анализа ведет порой к заведомо неприемлемому исключению редких и крайне ценных наблюдений. Использование же слишком «мягких» критериев отбора месяцев (лет) с малым числом наблюдений или неравномерным распределением этих наблюдений порой ведет к получению заведомо неверных выводов о динамике межгодовой изменчивости рассматриваемых величин и неверной оценке трендов. Из вышесказанного следует актуальность разработки методики, позволяющей использовать все имеющиеся наблюдения и, в то же время, избежать ошибочных выводов, основываясь на редких наблюдениях и иногда пренебрегая более частыми наблюдениями. В данной работе представлена техника оценки линейных трендов на основе срочных наблюдаемых значений с учетом их корреляции во времени. Ниже приведены результаты сравнения оценок трендов, полученных двумя обсуждаемыми методами. Описание точечного метода изложено в Приложении.

4. Результаты

Для сравнения методов расчета трендов для аномалий температуры вычислены средние квадратические значения ошибок расчета трендов по точечному методу (E_{At}) и по традиционному методу (E_{Am}) на основе срочных данных аэрологических наблюдений, содержащихся в массивах CARDS и ААНИИ. При расчете трендов по традиционному методу использованы месяцы с числом наблюдений не менее 10. Результаты расчетов представлены в таблице 1. Эти результаты показывают, что наименьшие ошибки расчета тренда имеют место при использовании точечного метода для расчета тренда по данным обоих массивов. Для точечного метода ошибка (E_{At}) определения тренда A_t практически всегда существенно меньше соответствующей ошибки для традиционного метода (E_{Am}), а это значит, что статистическую значимость тренда можно определить существенно точнее.

Таблица 1 – Table 1

Средние квадратические значения ошибок расчета трендов для аномалий температуры (°C/десятилетие), рассчитанных по точечному методу (EAt) и традиционному методу (EAm) по данным CARDS и срочным данным ААНИИ и характеристики гладкости трендов для аномалий температуры (SAт) и (SAм), (°C/десятилетие)

Mean-square values of biases of trends estimations in anomalies for temperature (°C/decade), calculated by points method (EAt) and by the traditional method (EAm) on base of CARDS and hourly observed values of AARI data set and characteristics of smoothness of trends in anomalies for temperature (SAт) and (SAм) (°C/10-years)

Месяц Month	Средние квадратические значения ошибок расчета трендов для аномалий температуры Mean-square values of biases of trends estimations in anomalies for temperature (°C/десятилетие – °C/10-years)				Характеристики гладкости трендов для аномалий температуры Characteristics of smoothness of trends in anomalies for temperature (°C/десятилетие – °C/10-years)			
	CARDS		ААНИИ – ААРИ		CARDS		ААНИИ – ААРИ	
	EAt	EAm	EAt	EAm	SAт	SAм	SAт	SAм
I	0.285	0.635	0.261	0.454	0.402	0.958	0.364	0.627
IV	0.457	1.269	0.340	0.654	0.324	0.939	0.287	0.477
VII	0.560	1.603	0.467	0.730	0.355	0.850	0.240	0.420
X	0.910	1.316	0.798	0.810	0.467	1.019	0.471	0.860
Все четыре месяца – All four months								
	0.605	1.234	0.517	0.673	0.395	0.949	0.359	0.634

На рисунке 1 показаны тренды для аномалий температуры на изобарических поверхностях, оцененные традиционным и точечным методами для многолетних центральных месяцев сезонов (января, апреля, июля, октября) по данным CARDS и данным ААНИИ для станции Беллинсгаузен. Из анализа рисунка 1 следует, что точечный метод позволяет получить заметно более гладкие профили трендов, что подтверждает их большую правдоподобность. Если оценивать степень гладкости, как среднюю квадратическую разность значений трендов A_i и A_{i+1} для соседних изобарических поверхностей i и $i+1$ по формуле:

$$GA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (A_{i+1} - A_i)^2}{n-1}} \quad (1)$$

где n – число изобарических поверхностей, то данные таблицы 1, содержащей характеристики гладкости трендов для аномалий температуры, рассчитанных по срочным данным массивов CARDS и ААНИИ с помощью точечного и традиционного методов, подтверждают, что, согласно данному критерию, наиболее гладкими являются тренды, оцененные точечным методом.

Поскольку массивы данных ААНИИ и CARDS имеют различные периоды наблюдения для станции Беллинсгаузен, необходимо определить, как сказывается на результатах расчета трендов разными методами использование временных рядов различной длины. Если рассмотреть среднюю квадратическую разность трендов, оцененных этими методами, то из таб. 2 видно, что наиболее близкие значения трендов (со среднеквадратической разностью 0.277°C/10-летие) дают вычисления точечным методом для обоих массивов данных. При использовании традиционного подхода для тех же массивов среднеквадратическая разность составляет 1.074°C/10-летие,

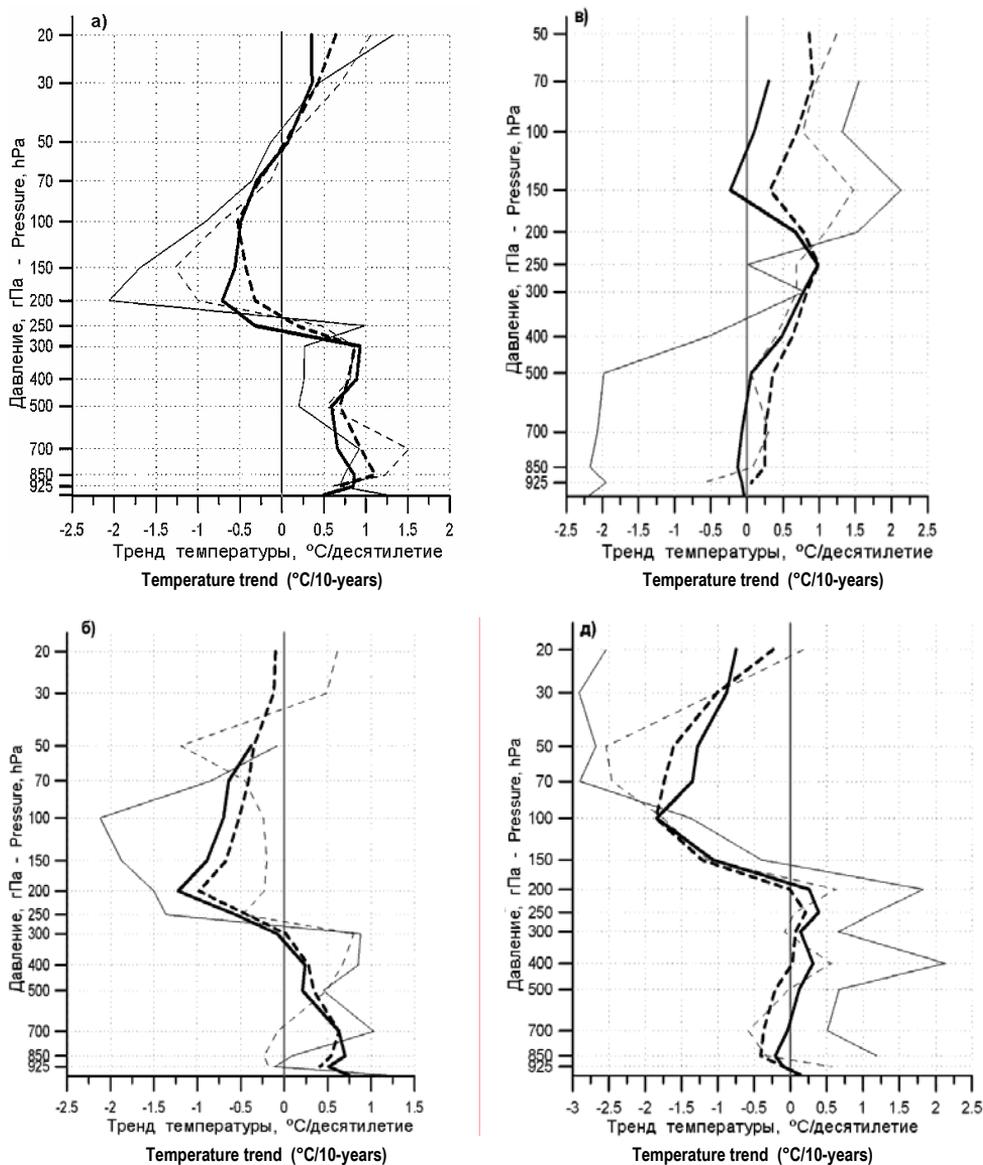


Рис. 1. Тренды температуры воздуха (°C/десятилетие) на изобарических поверхностях и уровне подстилающей поверхности для станции Беллинсгаузен, оцененные на основе средних месячных значений (тонкие линии) и срочных наблюдений (толстые линии) для многолетних центральных месяцев сезонов: а – января, б – апреля, в – июля, г – октября. Сплошные линии – тренды, вычисленные по данным CARDs (1970–1999 гг.); пунктирные - по аэрологическим данным архива ААНИИ (1969–1999 гг.) после комплексного контроля качества данных (Alduchov и др. 1996)

Fig. 1. Trends for temperature (°C/10-years) at isobaric levels and surface level for Bellingshausen station, obtained on base of monthly mean values (thin lines) and hourly observed values (thick lines) for multiannual central months of seasons: а – January, б – April, в – July, г – October. Solid lines – trends, calculated on base CARDs (1970–1999 years); dotted lines – trends, calculated on base AARI data set (1969–1999 years) after complex quality control of upper air parameters (Alduchov et al. 1996)

т.е. возрастает более чем в три раза по сравнению с соответствующим значением, полученным с помощью точечного метода. Следовательно, точечный метод является менее чувствительным к длине временного ряда в смысле близости оценок по массивам разной длины, что свидетельствует о возможности получения более надежных оценок параметров климатической изменчивости.

Таблица 2 – Table 2

Среднеквадратические разности между оценками трендов для аномалий температуры, рассчитанными разными методами по четырем центральным месяцам сезонов и всем изобарическим поверхностям по данным CARDS и срочным данным ААНИИ (°C/десятилетие)

Mean-square differences between estimations of trends in anomalies for temperature, calculated by different methods on base of CARDS and hourly observed values of AARI data set for central months of season and all isobaric levels, (°C/10-years)

Наборы данных Data set		CARDS		ААНИИ – AARI	
		At	Am	At	Am
CARDS	At	-	1.109	0.277	0.576
	Am	1.109	-	1.171	1.074
ААНИИ AARI	At	0.277	1.171	-	0.441
	Am	0.576	1.074	0.441	-

На рисунке 1 и в таблице 3 приведены оценки трендов аномалий температуры для стандартных изобарических поверхностей, полученные различными методами на основе массивов CARDS и ААНИИ. Для понимания причин расхождения в оценках трендов ниже приведен краткий сравнительный анализ полноты данных в исходных архивах. Так, число наблюдений из массива CARDS по сравнению с числом наблюдений из массива ААНИИ (для января и июля смотри таблицу 3), используемых для расчета трендов по точечному методу, в тропосфере на уровне 850 гПа составляет около 77% для января, 58% – для апреля, 56% – для июля и 74% – для октября. Для стратосферы число наблюдений температуры на изобарических поверхностях, содержащихся в массиве CARDS, по сравнению с массивом ААНИИ уменьшается на несколько процентов для каждого месяца и составляет для наивысшей изобарической поверхности около 70% для января, 53% – для апреля, 50% – для июля и 69% – для октября. При этом наивысшими изобарическими поверхностями (для CARDS) являются 20 гПа – для января, 50 гПа – для апреля, 70 гПа – для июля и 20 гПа – для октября.

Число месяцев, включенных для оценки трендов по традиционному методу, в массиве CARDS относительно массива ААНИИ, составляет в тропосфере на уровне 850 гПа около 81% для января, 57% – для апреля, 48% – для июля, 71% – для октября. Для наивысшей изобарической поверхности в стратосфере это соотношение несколько ниже: 66% – для января, 44% – для апреля, 46% – для июля, 59% – для октября.

Другим примером, демонстрирующим возможности точечного метода при недостаточной полноте данных наблюдений, являются оценки трендов температуры воздуха для июля на уровне изобарической поверхности 700 гПа. Из данных таблицы 3 для июля (см. также рис.1в) следует, что число наблюдений, используемых для оценки тренда по точечному методу для рассматриваемой поверхности, составляет 453 – в архиве CARDS и 815 – в архиве ААНИИ, что в 1.8 раз больше. Для оценки тренда по традиционному методу использовано 13 месяцев

из архива CARDS и 27 – из архива ААНИИ. При этом отличие в значениях трендов составило 0.32 и 2.37°C/десятилетие для точечного и традиционного методов, соответственно.

Для уточнения причины столь значительного различия в числе наблюдений температуры в анализируемых массивах на рисунке 2 приведены временные ряды среднемесячных значений температуры и число наблюдений для изобарической поверхности 850 гПа для центральных месяцев сезонов. Из этих данных видно, что в массиве ААНИИ именно первые годы наблюдений (с 1970 г. по 1976 г.) представлены значительно более полно по сравнению с массивом

Таблица 3 – Table 3

Тренды аномалий температуры для изобарических поверхностей, рассчитанные разными методами по данным CARDS (1970-1999 гг.) и ААНИИ (1969-1999 гг.)

Trends in anomalies for temperature at standard isobaric levels obtained by different methods on base of CARDS (1970-1999 years) and AARI data set (1969-1999 years)

Давление, гПа Pressure, hPa	По данным CARDS – CARDS data set						По данным ААНИИ – AARI data set					
	Точечный метод Points method			Традиционный метод Traditional method			Точечный метод Points method			Традиционный метод Traditional method		
	Число наблюдений Number of observations	Тренд, °C/десятилетие Trend, °C/10-years	σ_n для тренда σ_n for the trend	Число месяцев Number of months	Тренд, °C/десятилетие Trend, °C/10-years	σ_n для тренда σ_n for the trend	Число наблюдений Number of observations	Тренд, °C/десятилетие Trend, °C/10-years	σ_n для тренда σ_n for the trend	Число месяцев Number of months	Тренд, °C/десятилетие Trend, °C/10-years	σ_n для тренда σ_n for the trend
Январь – January												
20	384	0.35	0.39	14	1.32	0.72	552	0.64	0.34	22	1.06	0.45
30	446	0.36	0.30	17	0.44	0.48	642	0.43	0.27	23	0.70	0.37
50	510	0.07	0.21	20	-0.13	0.40	713	0.04	0.19	26	0.06	0.30
70	536	-0.30	0.21	20	-0.36	0.42	747	-0.27	0.19	26	-0.14	0.33
100	577	-0.49	0.24	21	-0.91	0.43	767	-0.53	0.22	26	-0.72	0.49
150	589	-0.56	0.24	21	-1.69	0.68	784	-0.43	0.21	26	-1.28	0.61
200	601	-0.71	0.30	21	-2.06	1.09	793	-0.32	0.26	26	-1.00	0.88
250	608	-0.32	0.36	21	0.98	0.54	796	0.18	0.31	26	0.47	0.35
300	610	0.93	0.33	21	0.27	0.50	799	0.87	0.32	26	0.86	0.40
400	611	0.89	0.32	21	0.26	0.66	800	0.79	0.29	26	0.81	0.44
500	610	0.59	0.30	21	0.20	0.73	800	0.69	0.27	26	0.53	0.49
700	613	0.66	0.31	21	0.92	0.64	800	0.94	0.30	26	1.51	0.48
850	616	0.86	0.33	21	0.74	0.47	800	1.11	0.31	26	1.23	0.39
925	603	0.85	0.20	21	0.69	0.41	533	0.66	0.24	17	0.60	0.27
Июль – July												
70	289	0.30	0.49	11	1.55	0.98	575	0.91	0.40	24	0.96	0.53
100	347	0.10	0.42	11	1.32	1.07	670	0.69	0.33	26	0.77	0.50
150	408	-0.23	0.42	12	2.13	1.77	767	0.32	0.33	27	1.47	0.79
200	437	0.67	0.44	12	1.53	1.22	804	0.78	0.34	27	1.09	0.57
250	443	0.98	0.45	12	0.01	0.81	810	0.99	0.38	27	0.68	0.35
300	448	0.78	0.46	12	0.79	0.86	814	0.83	0.41	27	0.69	0.38
400	449	0.48	0.52	13	-0.54	0.74	815	0.63	0.45	27	0.40	0.34
500	451	0.06	0.54	13	-1.98	1.05	815	0.36	0.45	27	0.06	0.50
700	453	-0.07	0.66	13	-2.07	1.91	815	0.25	0.56	27	0.30	0.90
850	453	-0.13	0.78	13	-2.17	2.12	814	0.25	0.66	27	0.08	1.09
925	439	-0.07	0.89	13	-1.95	1.92	596	0.06	0.81	18	-0.59	1.51

σ_n – среднеквадратическое отклонение – mean-square deviation

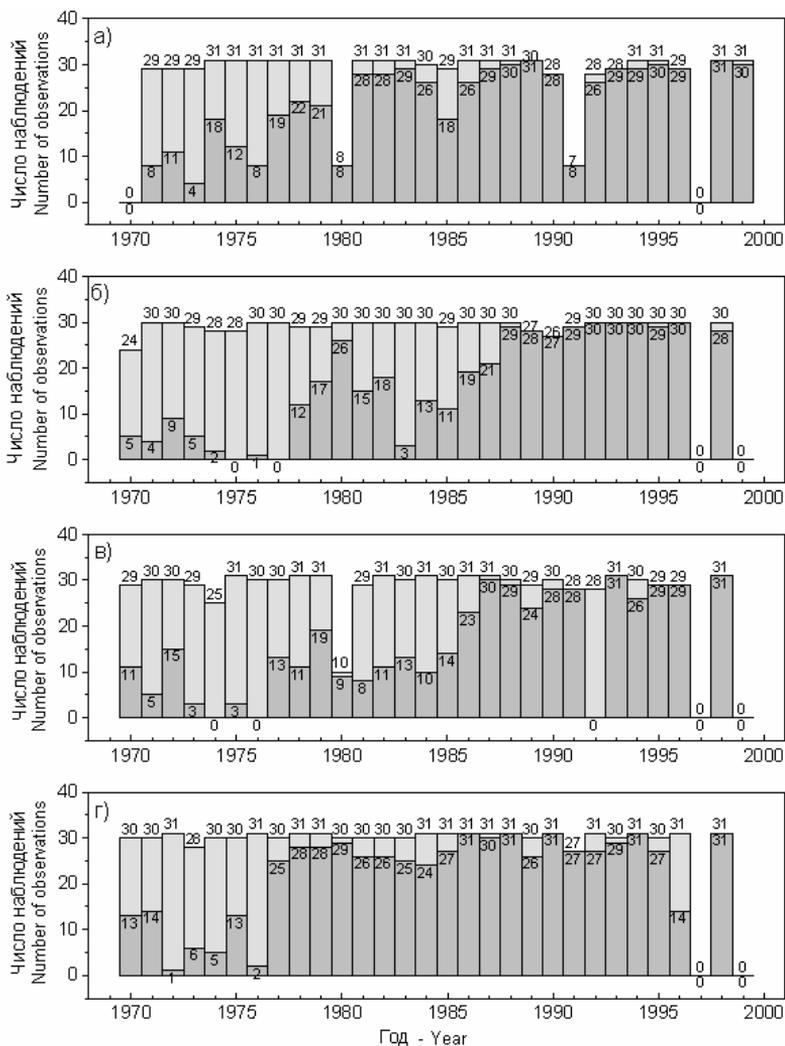
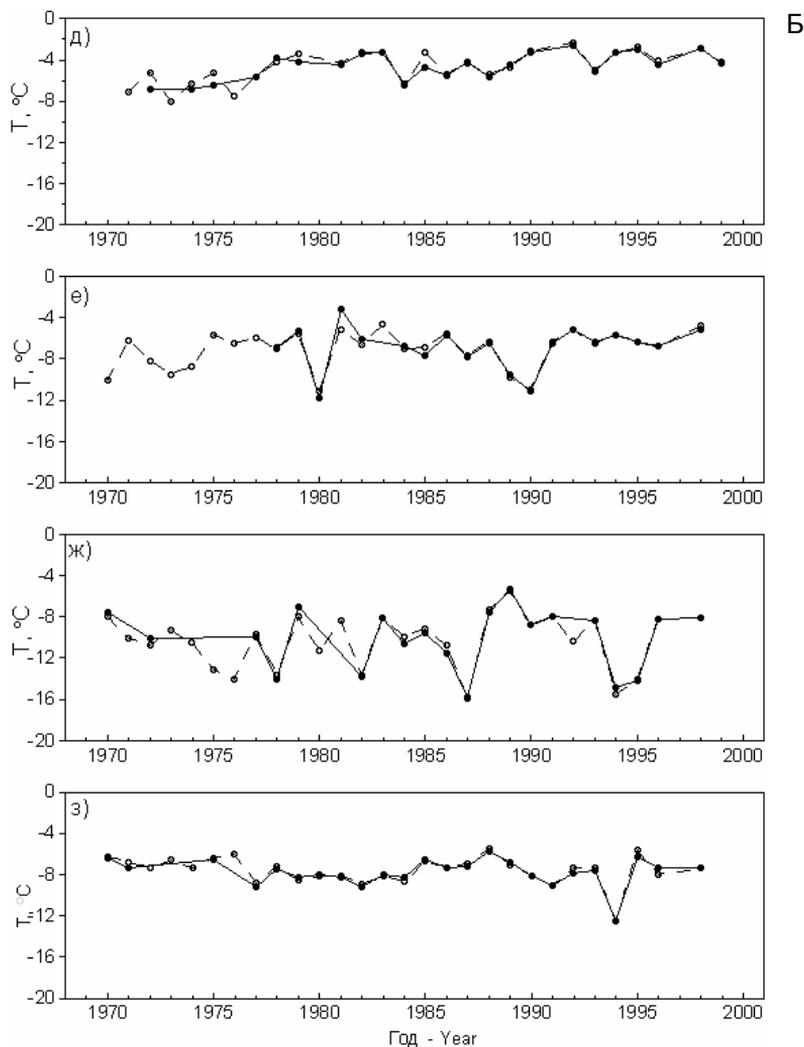


Рис. 2. Диаграммы А – числа наблюдений и Б – соответствующие временные ряды среднемесячных значений температуры (Т, °С), рассчитанных по срочным данным CARDs и ААНИИ для станции Беллинсгаузен для изобарической поверхности 850 гПа для января (а, д), апреля (б, е), июля (в, ж) и октября (г, з). На диаграммах А темно-серый цвет соответствует результатам, полученным по данным CARDs (1970–1999 гг.), и светло-серый – по аэрологическим данным архива ААНИИ (1969–1999 гг.). На диаграммах Б вычисления по данным CARDs соответствуют сплошные линии, а по данным архива ААНИИ после комплексного контроля качества данных (Alduchov и др. 1996) – пунктирные

Fig. 2. Diagrams A – of observations numbers and Б – corresponding time series of monthly mean values of temperature (T, °C), calculated on the base of CARDs and observed values of AARI data set for Bellingshausen station for isobaric level 850 hPa for January (a, d), April (б, e), July (в, ж), October (г, з). Dark grey colour at the diagrams A corresponds to results, obtained on the base of CARDs (1970–1999 years) and bright grey colour – to results, obtained on the base of AARI data set (1969–1999 years). Solid lines at the diagrams Б correspond to calculations on base CARDs (1970–1999 years); dotted lines – to calculations on base AARI data set (1969–1999 years) after complex quality control of upper air parameters (Alduchov et al. 1996)



CARDS. Несмотря на слабые ограничения на число наблюдений (не менее 10 за месяц) для расчета трендов температуры традиционным методом, только для 6 январей, 3 апрелей, 5 июлей и 7 октябрей из 11 возможных за период с 1970 г. по 1980 г. в массиве CARDS имеется достаточное число наблюдений. За тот же период для всех рассматриваемых месяцев, кроме января, в массиве ААНИИ присутствуют данные всех наблюдений. Для января среднемесячные значения рассчитаны для 8 из 11 возможных месяцев.

5. Заключение

Сравнение результатов оценок трендов, полученных разными методами на основе массивов CARDS и ААНИИ, показало их согласованность. Для предложенного точечного метода оценки трендов среднеквадратическая ошибка определения тренда практически всегда меньше соответствующей ошибки для традиционного метода, а это значит, что статистическую значимость тренда, полученного точечным методом, можно определить существенно точнее.

Точечный метод позволяет получить заметно более гладкие профили трендов, что подтверждает их более высокую правдоподобность, он менее чувствителен к длине ряда в смысле близости оценок по массивам разной длины. Использование различных методик для вычисления трендов показало, что предложенный новый робастный метод, основанный на использовании срочных данных с учетом их корреляции по времени, позволяет получать более точные и надежные оценки трендов по сравнению с традиционным методом. Это особенно важно при исследовании изменения климата в труднодоступных полярных районах планеты.

Данное исследование поддержано подпрограммой "Изучение и исследование Антарктики" Федеральной целевой программы "Мировой океан", а также проектом РФФИ № 04-05-64681.

Приложение

Точечный метод оценки линейных трендов по данным срочных наблюдений

Рассмотрим временной ряд $\{x_i, i = 1, \dots, N\}$ наблюдаемой случайной величины $X(t)$ в моменты времени $\{t_i, i = 1, \dots, N\}$. Предположим, что среднее значение величины $X(t)$ меняется во времени, но ее дисперсия постоянна, т.е.

$$\begin{cases} \overline{x_i(t)} = a \cdot t_i + b \\ \sigma(x(t)) = \sigma_x \end{cases} \quad (2)$$

где оператор осреднения \bar{x} и дисперсии $\sigma(x)$ рассматриваются как операторы по всему статистическому ансамблю возможных реализаций $\{x_i, i = 1, \dots, N\}$.

Обычно, при оценке трендов, наблюдаемые величины $\{x_i, i = 1, \dots, N\}$ рассматриваются как независимые. И это вполне естественное предположение по отношению, например, к средним месячным значениям (особенно, если рассматриваются не соседние месяцы, а один и тот же месяц для разных лет). Но, поскольку мы пытаемся оценить тренд по срочным наблюдениям, то ряд $\{x_i, i = 1, \dots, N\}$ может быть значительно коррелирован во времени. Положим, что эти корреляции зависят только от временного интервала между наблюдениями (т.е. мы предполагаем стационарность ряда по отношению к корреляционной функции)

$$\mu(x_i, x_j) = \mu(|t_i - t_j|) = \mu_{ij} \quad (3)$$

Это означает, что

$$\frac{\overline{x_i \cdot x_j} - \overline{x_i} \cdot \overline{x_j}}{\sigma_x^2} = \mu_{ij} \quad (4)$$

или

$$\overline{x_i \cdot x_j} = \mu_{ij} \cdot \sigma_x^2 + \overline{x_i} \cdot \overline{x_j} \quad (5)$$

Найдем наилучшую (в смысле среднеквадратических разностей) аппроксимацию $\hat{a} \cdot t + \hat{b}$ временного ряда $\{x_i, i = 1, \dots, N\}$. Это означает, что задача определения коэффициентов \hat{a} и \hat{b} сводится к минимизации функционала:

$$\sum_{i=1}^N (\hat{a} \cdot t_i + \hat{b} - x_i)^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

Оценки параметров \hat{a} и \hat{b} , которые позволяют получить этот минимум, могут быть определены из следующей системы соотношений:

$$\begin{cases} \left[\sum_{i=1}^N (\hat{a} \cdot t_i + \hat{b} - x_i)^2 \right]_a' = 0 \\ \left[\sum_{i=1}^N (\hat{a} \cdot t_i + \hat{b} - x_i)^2 \right]_b' = 0 \end{cases} \quad (7)$$

или

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N (\hat{a} \cdot t_i + \hat{b} - x_i) \cdot t_i = 0 \\ \sum_{i=1}^N (\hat{a} \cdot t_i + \hat{b} - x_i) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

или

$$\begin{cases} \hat{a} \cdot \sum_{i=1}^N t_i^2 + \hat{b} \cdot \sum_{i=1}^N t_i = \sum_{i=1}^N x_i \cdot t_i \\ \hat{a} \cdot \sum_{i=1}^N t_i + N \cdot \hat{b} = \sum_{i=1}^N x_i \end{cases} \quad (9)$$

Для упрощения дальнейших выкладок введем следующие обозначения

$$A_t = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i, \quad (10)$$

$$A_{tt} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i \cdot t_i, \quad (11)$$

$$A_x = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i, \quad (12)$$

$$A_{tx} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i \cdot x_i, \quad (13)$$

$$A_{t\mu} = \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_i \cdot t_j \cdot \mu_{ij}, \quad (14)$$

$$A_{t\mu} = \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_i \cdot \mu_{ij}, \quad (15)$$

и

$$A_{\mu} = \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_{ij}. \quad (16)$$

Затем, используя эти обозначения и выражая \hat{b} из второго уравнения системы (9), после подстановки его в первое уравнение системы Получаем

$$\begin{cases} \hat{a} \cdot A_{tt} + (A_x - \hat{a} \cdot A_t) \cdot A_t = A_{tx} \\ \hat{b} = A_x - \hat{a} \cdot A_t \end{cases} \quad (17)$$

или

$$\begin{cases} \hat{a} = \frac{A_{tx} - A_t \cdot A_x}{A_{tt} - A_t^2} \\ \hat{b} = A_x - \frac{A_t \cdot (A_{tx} - A_t \cdot A_x)}{A_{tt} - A_t^2} \end{cases} \quad (18)$$

Здесь следует обратить внимание на то, что $\{x_i\}$ есть случайные величины, тогда как $\{t_i\}$ есть детерминированные величины, а оценки \hat{a} и \hat{b} есть также случайные величины, как функции случайных величин $\{x_i\}$.

Теперь оценим среднеквадратическую разность между истинным значением коэффициента a и значением, полученным по реализации $\{x_i\}$ в соответствии с (18), т.е. «выборочным» значением \hat{a} :

$$\Delta \hat{a} = \overline{(\hat{a} - a)^2} = D\hat{a} + (S\hat{a})^2 \quad (19)$$

где

$$D\hat{a} = \overline{(\hat{a} - \bar{\hat{a}})^2} \quad (20)$$

есть дисперсия, а

$$S\hat{a} = \bar{\hat{a}} - a \quad (21)$$

есть смещение выборочного значения \hat{a} .

Однако прежде чем оценивать значения смещения $S\hat{a}$ и дисперсии $D\hat{a}$, оценим значения $\bar{\hat{a}}$ и $\bar{\hat{a}}^2$. Имеем

$$\bar{\hat{a}} = \overline{\left(\frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i \cdot x_i - A_t \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N x_j}{A_{tt} - A_t^2} \right)} = \frac{a \cdot (A_{tt} - A_t^2)}{A_{tt} - A_t^2} = a \quad (22)$$

и

$$\begin{aligned}
\widehat{a}^2 &= \left(\frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i \cdot x_i - \frac{1}{N} \cdot A_t \cdot \sum_{j=1}^N x_j}{A_{tt} - A_t^2} \right)^2 = \\
&= \frac{\frac{1}{N^2} \cdot \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_i \cdot t_j \cdot \mu_{ij} - 2 \cdot A_t \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_i \cdot \mu_{ij} + A_t^2 \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_{ij} \right) \cdot \sigma_x^2}{(A_{tt} - A_t^2)^2} \quad (23) \\
&= \frac{\frac{1}{N^2} \cdot \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_i \cdot t_j \cdot \overline{x_i} \cdot \overline{x_j} - 2 \cdot A_t \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_i \cdot \overline{x_i} \cdot \overline{x_j} + A_t^2 \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \overline{x_i} \cdot \overline{x_j} \right)}{(A_{tt} - A_t^2)^2}
\end{aligned}$$

Вторая часть последнего выражения в (23) после подстановки

$$\overline{x_i} \cdot \overline{x_j} = (a^2 \cdot t_i \cdot t_j + a \cdot b \cdot t_i + a \cdot b \cdot t_j + b^2) \quad (24)$$

в точности равна a^2 . В результате имеем

$$\widehat{a}^2 = \frac{(A_{tt} - 2 \cdot A_t \cdot A_{t\mu} + A_t^2 \cdot A_{\mu\mu}) \cdot \sigma_x^2}{(A_{tt} - A_t^2)^2} + a^2 \quad (25)$$

Это означает, что наша оценка \widehat{a} , полученная согласно (18), есть несмещенная оценка с $S\widehat{a} = 0$, и дисперсия этой оценки \widehat{a} равна

$$D\widehat{a} = \overline{(\widehat{a} - \overline{\widehat{a}})^2} = (\widehat{a}^2 - a^2) = \frac{(A_{tt} - 2 \cdot A_t \cdot A_{t\mu} + A_t^2 \cdot A_{\mu\mu}) \cdot \sigma_x^2}{(A_{tt} - A_t^2)^2} \quad (26)$$

Вывод соотношения для параметра b выполняется аналогично и не приводится здесь для ограничения объема статьи.

Таким образом, в рамках сделанных предположений о возможной изменчивости во времени средних значений процесса $X(t)$ и стационарности его дисперсии и корреляционной функции, по реализации наблюдаемых срочных значений $\{x_i, i = 1, \dots, N\}$ с использованием соотношений (18) можно получать оценки \widehat{a} линейного тренда (линейной оценки скорости изменения средних значений во времени). Соотношение (26) позволяет получить оценки дисперсии (т.е. «ошибки» расчета) для величины \widehat{a} . Для этого необходимо предварительно оценить дисперсию σ_x^2 и коэффициенты корреляции $\mu(|t_i - t_j|) = \mu_{ij}$. Это требует предварительных вычислительных работ по оценке временных корреляций рассматриваемой физической величины. Однако в результате мы получаем возможность «правильного» учета распределения имеющихся наблюдаемых значений на любом отрезке времени (например, в течение месяца). Более того, появляется возможность учета результатов тех редких наблюдений, которые были проведены на каждой конкретной станции.

Литература

- Alduchov O.A., Eskridge R.E., 1996, Complex quality control of upper air parameters at mandatory and significant levels for the CARDS dataset. – Asheville, NC. NCDC Report, 1996, 135 p.
- Алдухов О.А., Лагун В.Е., Черных И.В., 2003, О климатических изменениях параметров свободной атмосферы и циклонической активности над Антарктическим полуостровом. Всемирная конференция по изменению климата. 29 сентября – 3 октября 2003 г. Тезисы докладов: 367 с.
- Алдухов О.А., Оржеховская В.А., Садовникова Т.О., Руденкова Т.В., 1990, Архив текущей аэрологической информации "АЭРОСТАБ". Описание архива. Обнинск: 28 с.
- Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З., 2003, Климатическая система и обеспечение гидрометеорологической безопасности жизнедеятельности России. Всемирная конференция по изменению климата. 29 сентября-3 октября 2003 г. Тезисы докладов: 88–90.
- Comiso J.C., 2000, Variability and trends in Antarctic surface temperatures from in situ and satellite infrared measurements. *Journal of Climate*, 2000, 15 (10): 1674–1696.
- Черных И.В., Алдухов О.А., 2003, Совместный анализ климатических изменений вертикальной макро-структуры облачности и параметров свободной атмосферы в Антарктике. Всемирная конференция по изменению климата. 29 сентября – 3 октября 2003 г. Тезисы докладов: 384 с.
- Данилов А.И., Лагун В.Е., Клепиков А.В., Катцов В.М., Вавулин С.В., 2003, Текущие изменения климата Антарктики и сценарии его будущих изменений. *Арктика и Антарктика. Наука*, вып. 2 (36): 114–125.
- Eskridge R.E., Alduchov O.A., Chernykh I.V., Zhai P., Doty S.R., Polansky A.C., 1995, A Comprehensive Aerological Reference Data Set (CARDS): Rough and systematic errors. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76: 1959–1775.
- Harangozo S.A., Colwell S.R., King J.C., 1997, An analysis of a 34-year air temperature record from Fossil Bluff (71°S, 68°W), Antarctica. *Antarctic Science*, 1997, 9: 355–363.
- Jagovkina S.V., Lagun V.E., 2004, Climatology of Antarctic upper-air parameters. *Polish Polar Studies*, 30. Akademia Morska w Gdyni: 131–142.
- Jagovkina S.V., Alduchov O.A., Chernykh I.V., Lagun V.E., 2004, Antarctic free atmosphere parameters variability diagnosis. SCAR Open Science Conference, 26-28 July 2004, Bremen, Germany. Abstract: S16/P.07: 371 s.
- King J.C., Comiso J.C., 2003, The spatial coherence of interannual temperature variations in the Antarctic Peninsula. *Geophysical Research Letters*, 30 (2), p. 1040, doi: 10.1029/2002GL015580.
- King J.C., Harangozo S.A., 1998, Climate change in the western Antarctic Peninsula since 1945: observations and possible causes. *Annals of Glaciology*, 27: 571–575.
- Майстрова В.В., Нагурный А.П., Большакова И.И., 2002, Изменение температуры свободной атмосферы в северной полярной области в 1959-2000 гг. *Метеорология и гидрология*, 6: 5–14.
- Marshall G.J., Lagun V.E., Lachlan-Cope T.A., 2002, Changes in Antarctic Peninsula tropospheric temperatures from 1956 to 1999: a synthesis of observations and reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 22 (3): 291–310.
- Нагурный А.П., Зайцева Н.А., Алексеев Г.В., Медведченко Е.Ю., Шумбер А., Каль Дж., Шнелл Р., 2001, Об архиве данных радиозондирования, полученных на ледовых дрейфующих станциях "Северный Полюс". *Метеорология и гидрология*, 6: 55–61.
- Seidel D.J., Angell J.K., Free M., Christy J., Spencer R., Klein S.A., Lanzante J. R., Mears C., Schabel M., Wentz F., Parker D., Thorne P., Sterin A., 2004, Uncertainty in Signals of Large-Scale Climate Variations in Radiosonde and Satellite Upper-Air Temperature Datasets. *Journal of Climate*, 17 (11): 2225–2240.
- Стерин А.М., 2004а, О чувствительности оценок трендов температуры тропосферы и нижней стратосферы по радиозондовым данным. Часть 1: Выбор массива данных, периода рядов и техники их анализа. *Метеорология и гидрология*, 5: 21–36.

- Стерин А.М., 2004б, О чувствительности оценок трендов температуры тропосферы и нижней стратосферы по радиозондовым данным. Часть 2: Обнаружение неоднородностей в рядах месячного разрешения. Метеорология и гидрология, 6: 5–22.
- Шойгу С.К., 2003, Изменение климата и чрезвычайные ситуации на территории России. Всемирная конференция по изменению климата. 29 сентября–3 октября 2003 г. Тезисы докладов: 68–69.
- Turner J., Colwell S.R., Marshall J., Lachlan – Cope T., Carleton A.M., Jones P.D, Lagun V.E, Reid P.A., Iagovkina S., 2004, The SCAR READER project: Towards a high-quality data base of mean Antarctic meteorological observations. *Journal of Climate*, 17 (14): 2890–2898.
- Turner J., Colwell S.R., Marshall J., Lachlan – Cope T., Carleton A.M., Jones P.D, Lagun V.E, Reid P.A., Iagovkina S., 2005, Antarctic climate change during the last 50 years. *International Journal of Climatology*, 25: 279–294.
- Vaughan D.J., Doake A., 1996, Recent atmospheric warming and retreat of ice shelves on the Antarctic Peninsula. *Nature*, 379: 38–331.
- Wallis T.W.R., 1997, A subset of core stations from the Comprehensive Aerological Reference Data Set (CARDS). *Journal of Climate*, 11 (2): 272–282.
- Zaitseva N.A., 1993, Historical Development in radiosonde systems in the Former Soviet Union. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74: 1893–1900.

O zmianach klimatu troposfery w rejonie Półwyspu Antarktycznego

Streszczenie

Porównanie rezultatów oceny trendów otrzymanych różnymi metodami z opracowania zbiorów danych CARDS i AANII wykazało ich zgodność. W przypadku trendów szacowanych za pomocą przedstawionej metody punktowej, ich średni kwadratowy błąd jest praktycznie zawsze mniejszy, niż błąd oceny trendu oszacowanego metodą tradycyjną. Oznacza to, że istotność statystyczna trendu oszacowanego metodą punktową jest wyższa, a sam trend jest oszacowany bardziej dokładnie. Metoda punktowa pozwala na uzyskanie wyraźniej gładszego przebiegu linii trendu co potwierdza jego wyższe prawdopodobieństwo, trend szacowany tą metodą jest również mniej wrażliwy na zmienne długości ciągów danych (w sensie dużego podobieństwa ocen wartości trendu ze zbiorów danych o różniących się długościami). Wykorzystanie zróżnicowanych metodyk dla obliczania trendów wykazało, że przedstawione nowe podejście, opierające się na wykorzystaniu danych terminowych z uwzględnieniem ich korelacji w czasie, pozwala otrzymać dokładniejsze i bardziej wiarygodne oceny wartości trendów w porównaniu z metodami tradycyjnymi. Jest to szczególnie ważne przy badaniach zmian klimatu zachodzących na trudnodostępnych obszarach polarnych naszej planety.

Przedstawione badania wykonano w ramach podprogramu „Poznanie i badania Antarktyki” Federalnego Programu Celowego „Ocean Światowy”, a także projektu RFFI No 04-05-64681.

Summary

Comparison of estimations of trend values, obtained by different methods on the base of CARDS and AARI data set, has shown its consistency. Research reveals: trend error determination for points method is less than in months method and therefore statistical significance of trend can be determined more carefully; points method gives the possibility of getting much smoother trend profiles and this is likelihood; points method estimation results are less sensitive to the time series length. The using of

different methods for estimations of the trend values has shown that new presented robust method, based on the using of hourly observed values with provision for correlation dependence in time (points method), presents the possibility to more accurate estimate of trends values in comparison with the traditional approach in trend estimation. This is important for investigation of climate change of Polar Regions of the Earth due difficult weather conditions and weather observations at the regions.

The study was supported by Russian Program "Study and Investigation of Antarctica" and RFBR Project 04-05-64681.