

Вклад России в Международный полярный год 2007/08
Series: Contribution of Russia to International Polar Year 2007/08

Метеорологические и геофизические исследования

Meteorological and geophysical researches

Главный редактор тома

Г.В. Алексеев

Editor-in-chief

G.V. Alekseev

Редакционная коллегия

И.И. Мохов, В.Ф. Радионов, О.А. Трошичев

Editorial Board

I.I. Mokhov, V.F. Radionov, O.A. Troshichev

ООО «Паулсен». Москва – Санкт-Петербург
2011

Paulsen Editions. Moscow – Saint-Petersburg
2011

Климатические изменения в морской Арктике в начале XXI века

Г.В. Алексеев, Н.Е. Иванов, А.В. Пньюшков,
Н.Е. Харланенкова

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация

Благодаря полученным в период МПГ 2007/08 данным, объединенным с ранее собранными данными о состоянии водных масс, морских льдов и атмосферы, оказалось возможным проследить развитие потепления в 1990–2000-х годах в морской Арктике, его связь с изменениями глобального климата и сравнить с потеплением в 1930–40-е годы. В статье анализируются особенности состояния климатической системы в первое десятилетие XXI столетия и в период проведения МПГ 2007/08 в сравнении с состоянием атмосферы, морских льдов и океана в предшествующий период. Рассматриваются изменения характеристик состояния атмосферы, морских льдов и океана, проводится сравнение с изменениями в других областях и с оценками по расчетам на глобальных моделях климата из ансамбля CMIP3.

Введение

Арктика составляет часть климатической системы Земли, тесно связанную с другими ее частями переносами тепла, влаги, соли и воды циркуляцией атмосферы и океана. Здесь формируются усиленные этими взаимосвязями изменения климата, среди которых особое внимание привлекает деградация морских льдов в Северном Ледовитом океане (СЛО), остро реагирующих на изменения климата. Одновременно Арктика является одним из районов, для которых пока не удается получить хорошего согласия между глобальными моделями и наблюдениями в воспроизведении происходящих изменений климата.

Потепление в Арктике, начавшееся в конце 1980-х годов, усилилось с середины 1990-х годов и достигло максимального развития к 2007 году. В этот период происходило резкое сокращение площади, занимаемой морскими льдами в конце летнего периода. В Арктическом бассейне распространялась обширная положительная аномалия температуры в подповерхностном слое воды атлантического происхождения (АВ) и изменилось распределение пресной воды в верхнем слое. На этот климатический сдвиг пришлось возрождение арктических экспедиционных исследований, увенчавшееся проведением Международного полярного года 2007/08.

По проекту ААНИИ «Комплексные исследования центральной части СЛО» в период МПГ 2007/08 проводились скоординированные широкомасштабные наблюдения в Арктическом бассейне с использованием научного судна ледокольного типа, вертолетов, дрейфующих станций «Северный Полюс». Одновременно выполнялись другие национальные и международные проекты, включавшие океанографические наблюдения с помощью стационарных и дрейфующих авто-

номных устройств (WHOI) и измерения водообмена через проливы (*Schauer et al., 2004*). В рамках проекта ААНИИ был выполнен также комплекс измерений структуры атмосферного погранслоя надо льдом, газового состава и аэрозольных компонент, составляющих теплового баланса на поверхности Арктического бассейна (*Ашик и др., 2010*).

Сравнение полученных результатов с результатами крупномасштабных наблюдений в 1970-е годы, наиболее освещенные наблюдениями в СЛО, а также в другие периоды, для которых имеются наблюдения, проливает свет на особенности и причины различий между ними. Благодаря полученным данным, объединенным с ранее собранными данными о состоянии водных масс, морских льдов и атмосферы, оказалось возможным проследить развитие климатического феномена конца 1990 – начала 2000-х годов в морской Арктике, его связь с изменениями глобального климата и сравнить с потеплением в 1930–40-е годы.

Ниже анализируются особенности состояния климатической системы в первое десятилетие XXI столетия и в период проведения МПГ 2007/08 в сравнении с состоянием атмосферы, морских льдов и океана в Арктике в предшествующий период. Рассматриваются изменения репрезентативных характеристик состояния атмосферы, морских льдов и океана в Арктике и Северной полярной области, проводится сравнение с изменениями в других областях и с оценками по расчетам на глобальных моделях климата из ансамбля СМIP3.

Температура воздуха

Результаты климатических исследований, основанные как на данных наблюдений и палеоклиматических реконструкциях, так и на результатах численных экспериментов с климатическими моделями, указывают на потепление климата на Земле, по крайней мере, в течение последних 130 лет (*IPCC, 2007*). При этом на фоне глобального потепления сохраняются неопределенности в оценке согласованности с ним региональных изменений климата, во многом проистекающие из недостаточного количества климатических данных и сложных обратных связей. К таким регионам относится Арктика, оценки темпов потепления в которой не всегда подтверждали его усиление (*Polyakov et al., 2002*) по сравнению со средним по полушарию потеплением.

Для оценки изменений приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в Арктике здесь использованы данные о среднемесячной температуре за столетний период на 30 станциях, расположенных севернее 60° с.ш. (рис. 1), собранные в базе метеорологических данных (*Александров и др., 2007*).

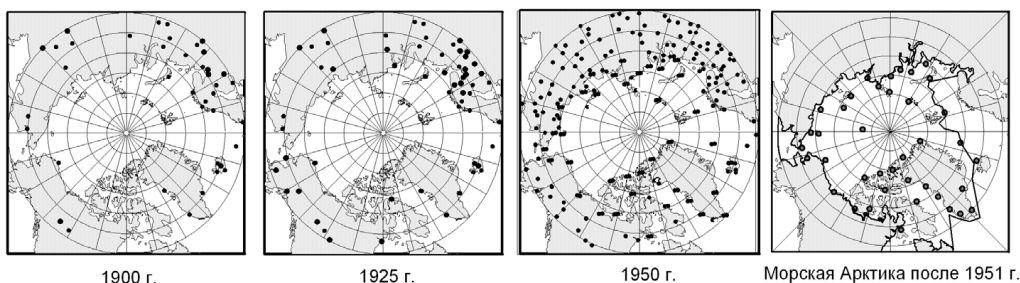


Рис. 1. Метеорологические станции в Северном полушарии севернее 60° с.ш. в разные периоды XX столетия

Такой выбор связан с тем, что существующие сеточные массивы данных о температуре с начала 20-го столетия основаны на меняющемся во времени количестве станций, что влияет на качество интерполяции в узлы сетки. Сравнения данных из сеточных массивов с данными на отдельных станциях показали существенные различия в средних значениях и в коэффициентах линейного тренда даже для современных массивов NCEP и ERA-40 (Кораблев и др., 2007).

Использование постоянного набора станций позволяет избежать проблем, связанных с интерполяцией, и применять при оценке изменений как простое осреднение исходных данных, так и построение распределений различных статистик постанционных временных рядов. Сеточный массив NCEP (Kalnay et al., 1996) использован для дополнительной верификации результатов анализа изменений температуры после 1950 года. Сравнение средних по соответствующей области по данным NCEP и по станциям за этот период показало, что коэффициенты корреляции между рядами среднемесячных ПТВ находятся в пределах 0.81–0.90.

Изменения средней по всем 30 станциям приповерхностной температуры воздуха, а также средней по станциям в приатлантической и тихоокеанской половинах области, разделенных по меридианам 90° – 270° в.д., за столетний период в каждый сезон и в среднем за год представлены на рис. 2.

Коэффициенты тренда за весь период для всех рядов положительны и, за исключением 5 рядов, значимы на 95% и более уровне. Для всех рассматриваемых областей осенние тренды минимальны и незначимы, а весенние все значимы. В целом тренды сильнее в тихоокеанской, чем в атлантической половине области. При этом оценки трендов неустойчивы к сдвигу начала ряда на более поздние годы. Коэффициенты тренда быстро убывают по мере приближения начала ряда к 1925 году вплоть до смены знака тренда для зимы.

Сравнение средних температур за десятилетие 1998–2007 гг. и за самое теплое десятилетие первого потепления показывает (рис. 3), что в среднем за год, весной и летом ПТВ в десятилетие 1998–2007 гг. лет выше во всех рассматриваемых районах (Алексеев и др., 2010б). Однако зимой соотношение обратное для всей области и ее атлантической половины. Осенью 1998–2007 гг. было теплее, при этом самые теплые осенние сезоны в период первого потепления отмечались в конце 1940-х – начале 1950-х годов.

Сравнение двух потеплений в терминах порядковых статистик рядов среднемесячных данных на 41 станции (с 1921 года) позволяет проследить эволюцию распределения наиболее теплых и холодных месяцев в 1921–2008 гг.. Порядковая статистика $x_{(i)}$ (i -тое значение вариационного ряда, где $i=N(np+1)$ – наибольшее целое число в $(np+1)$, n – длина ряда, N – оператор взятия целого числа, p – порядок квантиля) используется для определения года, в который ПТВ в данном месяце и на данной станции была ниже заданного квантиля x_p . Точно также $x_{(i)}$, где $i=N(n(1-p)+1)$ используется для определения года, в который ПТВ выше x_{1-p} .

Суммирование отмеченных таким образом лет по всем станциям, состоящее в подсчете числа случаев, когда данный год попадал в выбранный полуинтервал ($<x_p$ или $>x_{1-p}$), дает распределение повторяемости таких случаев на диаграмме год/месяц. Также подсчитывается число экстремумов, приходящихся на данный год в данном месяце суммарно по всем станциям. Чтобы повысить достоверность и наглядность представления получаемых таким образом значений повторяемости, проводилось их суммирование внутри скользящих интервалов по 9 лет с отнесением полученной суммы к середине или началу интервала. Представление полученных значений на диаграмме (год, месяц) показывает эволюцию температурных условий в арктическом регионе на протяжении рассматриваемого перио-

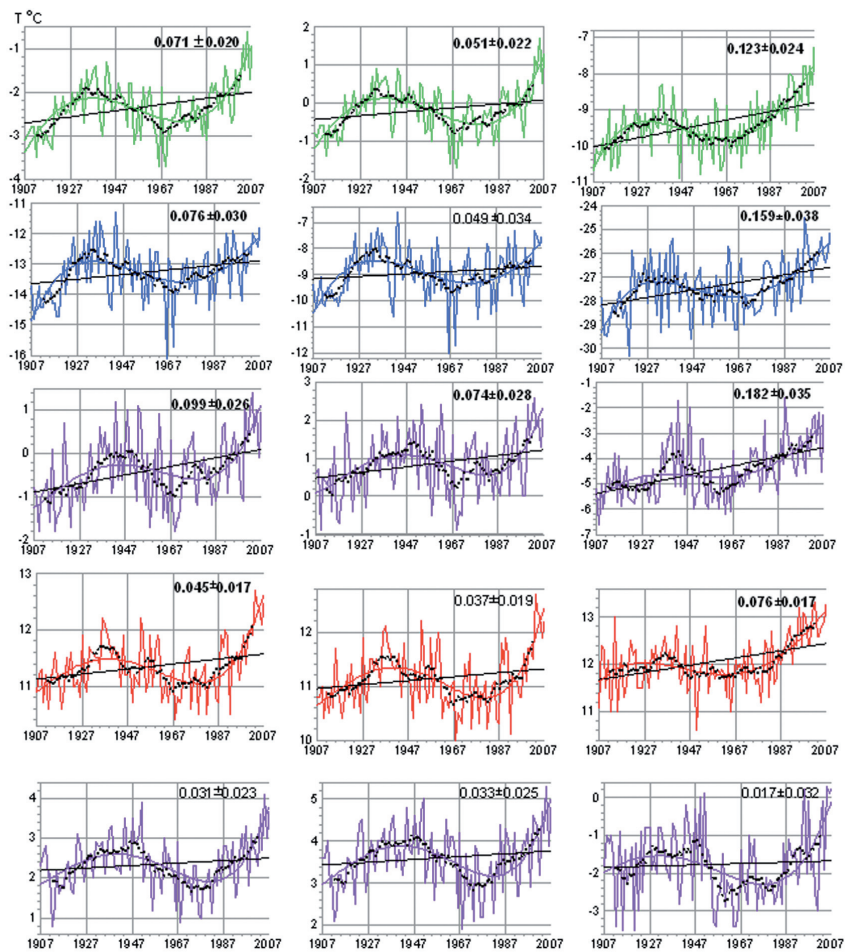


Рис. 2. Сверху вниз: средняя за год, за ноябрь–март, апрель–май, июнь–август и сентябрь–октябрь приповерхностная температура воздуха (°C), осреднённая по 30 станциям к северу от 60°с.ш. (левая колонка), по станциям в атлантической (в центре) и тихоокеанской (справа) половинах этой области. Прямая наклонная линия – тренд, точки – скользящие средние за 11 лет, жирная кривая линия – аппроксимация полиномом 4-й степени. Цифрами даны значения коэффициента тренда и его стандартной ошибки, °C/10 лет (жирным шрифтом выделены значимые на 95% уровне тренды)

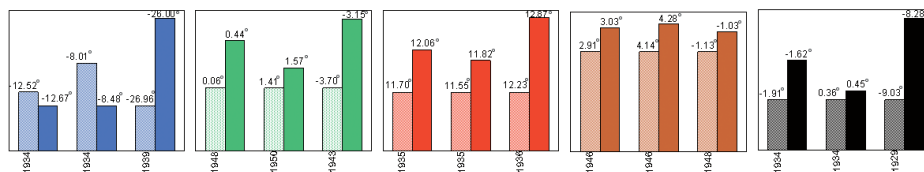
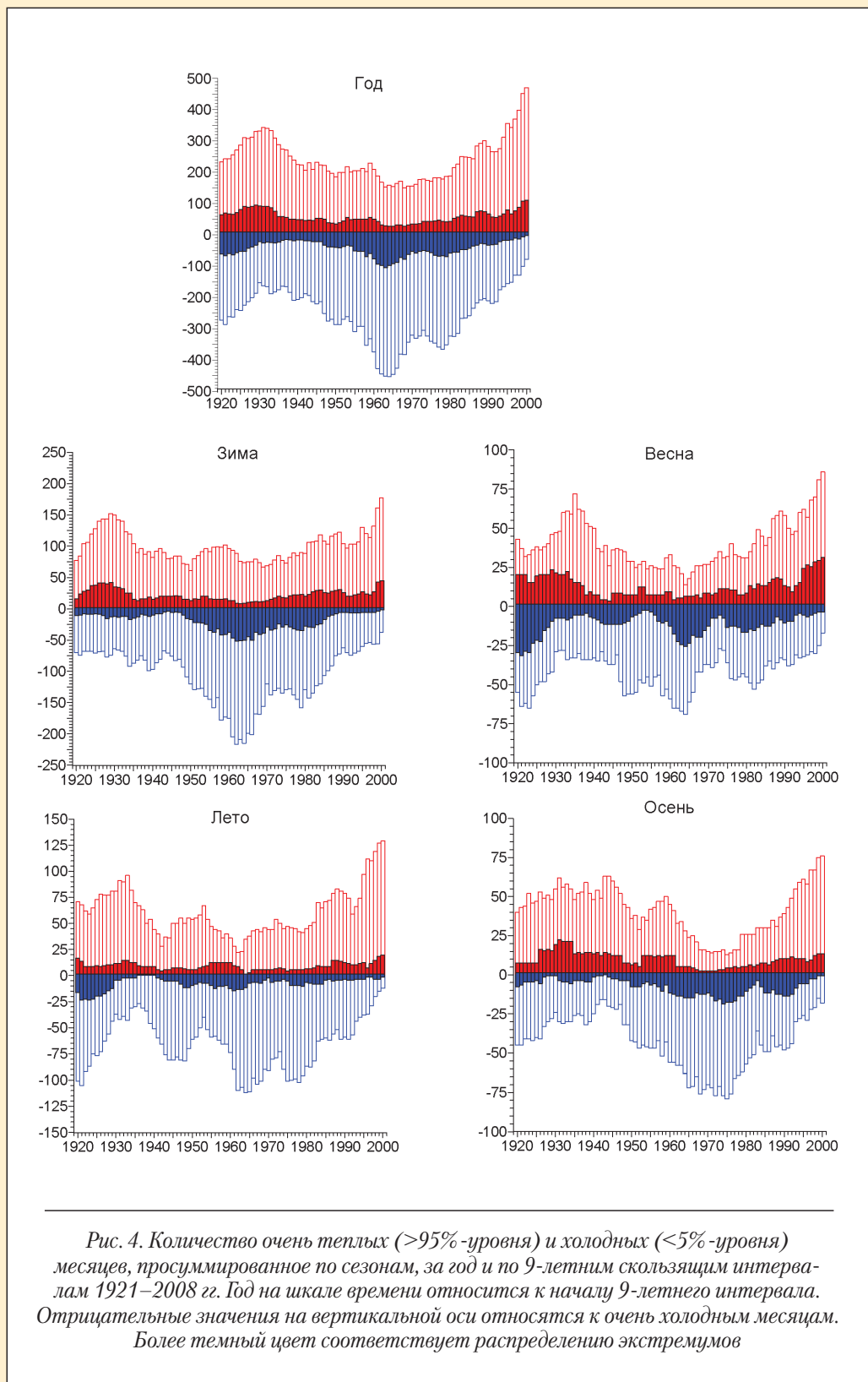


Рис. 3. Средняя ПТВ в самое теплое десятилетие в первом потеплении (первый столбик) и в 1998–2007 гг. (второй столбик) в разные сезоны (слева на право – зима, весна, лето, осень, год) во всей области, в приатлантической и притихоокеанской ее половинах (соответственно, первая, вторая и третья пара столбиков в каждом сезоне)



да в зависимости от месяца года. Если просуммировать повторяемости по сезонам и за год, то можно увидеть (рис. 4), что число теплых месяцев увеличилось в последнее десятилетие, причем быстрее всего летом и за год в целом.

Указанные особенности потеплений подтверждаются распределением рангов отдельных месяцев за 1901–2009 гг. (таблица 1). С апреля по декабрь все самые «теплые» месяцы приходятся на период с 2003 по 2009 год. Лишь самый «теплый» январь был в 1930 году, а февраль и март – в 1995 и 1996 гг. Наибольшее число самых «теплых» месяцев (по 3) отмечено в 2003 и 2007 гг., самым «теплым» годом стал 2005-й, самое теплое лето пришлось на 2003 год, зима – на 2008 год, весна – на 2007 г., осень – на 2005 год.

Таблица 1. Годы, на которые пришлись самые тёплые месяцы, сезон и год, соответствующие 1, 2 и 3 рангам в рядах средней ПТВ в области севернее 60° с.ш. за 1901–2009 гг.

Месяц/сезон	Ранги		
	1	2	3
I	1930	2007	1925
II	1995	1934	1959
III	1996	2007	2003
IV	2007	1953	2000
V	2003	2005	2004
VI	2006	1953	2005
VII	2003	2007	2004
VIII	2003	1945	2009
IX	2009	1938	2006
X	2007	2005	1951
XI	2005	1924	1943
XII	2007	2006	2008
Зима, XII-II	2008	1937	1944
Весна, III-V	2007	2003	2000
Лето, VI-VIII	2003	2007	2004
Осень, IX-XI	2005	2007	1938
Год	2005	2007	2003

На рис. 2 помимо положительного тренда в изменениях средней ПТВ хорошо выражено долгопериодное колебание, формируемое потеплениями 1930–40-х и 1990–2000-х годов и понижением температуры в 1970-е годы. Предполагается, что это проявление низкочастотного колебания естественного происхождения с периодом 60–70 лет (*Schlesinger and Ramankutty, 1994; Delworth et al., 1997; Polyakov and Johnson, 2000*), которое обычно называется атлантическим междесятилетним колебанием (осцилляцией (АМО)).

Дисперсионный анализ ряда среднегодовой ПТВ для рассматриваемой области показывает, что на долю этого низкочастотного колебания, аппроксимированного суммой трех ($k = 2-4$) членов разложения по полиномам Чебышева, приходится 37% изменчивости среднегодовой ПТВ, в то время как на долю линейного тренда 11% и на долю остатка, соответственно, 52 %.

Распределение вклада определенного таким образом АМО в изменчивость среднегодовой ПТВ весьма неравномерно (рис. 5). Наибольший вклад (от 22 до 45%) отмечается на 7 станциях в Гренландско/Исландском районе, который и формирует в значительной степени вклад АМО в изменения средней температуры в Арктике. Разложение АМО в ряд Фурье показывает, что в распределении вклада первой его гармоники также выделяется Гренландско/Исландский регион.

Время наступления ее первого максимума здесь приходится на 1940-е годы (рис. 5). Следует отметить, что изменения среднегодовой ПТВ в этом районе отличается необычайно быстрым ростом в течение десятилетия 1920-х годов, не имеющим аналогов ни в одном другом регионе.

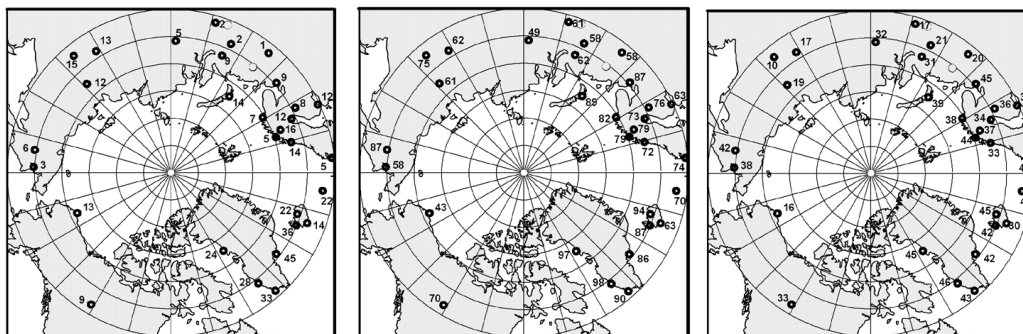


Рис. 5. Слева направо: вклад АМО в изменения среднегодовой ПТВ, вклад первой гармоники Фурье-разложения АМО, год максимума первой гармоники (две последние цифры после 19)

Другая особенность выделенного АМО в том, что рост ПТВ во втором его полу периоде (после 1970-х гг.) отличается от такового в первом полу периоде. Эту особенность можно использовать для приближенной оценки усиления (ослабления) амплитуды колебания вследствие дополнительного внешнего воздействия, предположительно, антропогенного. В пользу предположения об антропогенном усилении АМО после 1970-х годов свидетельствуют результаты экспериментов с глобальными моделями климата при неизменном и растущем содержании CO_2 в атмосфере (IPCC, 2007). Расхождения между средней (глобальной, полушарной, региональной) ПТВ при постоянной концентрации и при растущем содержании CO_2 начинаются как раз в середине 1970-х годов. Исходя из этого, усиление АМО оценим как разность между 31-летними трендами, аппроксимирующими рост ПТВ на стадии развития обоих потеплений. Будем оценивать разность вкладов тренда за 1978–2007 годы и за 31-летие в период развития первого потепления с максимальным вкладом тренда.

В таблице 2 приведены результаты расчета усиления тренда в период с 1978 по 2007 год в сравнении с наиболее быстрым ростом ПТВ за 31-летний период первого потепления для каждого сезона и среднегодовой ПТВ.

В соответствии с полученными оценками зимой нет усиления роста, а наоборот, рост замедляется. В теплые сезоны с апреля по октябрь усиление потепления весьма значительно как в целом в рассматриваемой области, так и в обеих ее половинах и оно наибольшее в летние месяцы. В среднем за год усиление потепления заметно в тихоокеанской половине области и незначительно в приатлантической части и во всей области. Заключение об усилении тренда ПТВ в последнее 31-летие в теплую часть года по сравнению с трендом в зимние месяцы подтверждается сравнением рангов коэффициентов тренда за оба 31-летних периода (таблица 3).

В ноябре, декабре и январе первое потепление развивалось значительно интенсивнее по сравнению с последним потеплением, а в остальные месяцы тренд во второй период был намного сильнее. Особенно велико различие в скорости потепления в июне. Изменение числа «теплых» ($T > 95\%$ уровня) месяцев в 9-лет-

Таблица 2
Сравнение вклада трендов за 31-летние периоды роста ПТВ
в первом и втором потеплениях в области севернее 60° с.ш.

Вся область										
сезон	год		зима		весна		лето		осень	
период	1908-1938	1978-2008	1908-1938	1966-1996	1909-1939	1978-2008	1910-1940	1978-2008	1908-1938	1979-2009
К-т тренда	0.0514	0.0556	0.0910	0.0672	0.0438	0.0538	0.0296	0.0499	0.0554	0.0614
Регр. сумма	6.51	7.13	20.77	11.78	4.96	7.13	2.54	6.82	7.44	9.61
Разн. сумм	0.62		-8.99		2.17		4.28		2.17	
Усиление	9%		-43%		30%		63%		22%	
Атлантическая часть (270-90° д.)										
период	1908-1938	1978-2008	1907-1937	1979-2009	1909-1939	1978-2008	1919-1940	1978-2008	1908-1938	1979-2009
К-т тренда	0.0552	0.060	0.0953	0.0735	0.0499	0.0552	0.0342	0.0505	0.0612	0.0506
Регр. сумма	8.37	8.68	22.63	13.95	6.20	8.06	2.48	5.89	8.99	6.82
Разн. сумм	0.31		-8.68		1.86		3.41		-2.17	
Усиление	1%		-38%		23%		58%		-24%	
Тихоокеанская часть (90-270° д.)										
период	1908-1938	1977-2007	1908-2008	1965-1995	1914-1934	1979-2009	1902-1932	1978-2008	1901-1931	1979-2009
К-т тренда	0.0404	0.0567	0.0915	0.0774	0.0370	0.0630	0.0209	0.0469	0.0562	0.1178
Регр. сумма	4.65	8.37	21.39	15.81	5.27	10.54	0.93	5.27	8.37	35.03
Разн. сумм	3.72		-5.58		5.27		4.34		26.66	
Усиление	44%		-26%		50%		82%		76%	

Таблица 3.
Ранг максимального тренда за 31 год в период развития двух потеплений.
Год относится к середине 31-летнего периода. В скобках указан ранг

Месяц, сезон	Первое потепление, 1920-1940-е гг.	Второе потепление, 1980-2000-е гг.
1	1922 (1)	1994 (15)
2	1926 (3)	1981 (1)
3	1924 (7)	1978 (1)
4	1939 (2)	1993 (1)
5	1928 (3)	1993 (1)
6	1925 (20)	1993 (1)
7	1926 (10)	1993 (1)
8	1926 (4)	1994 (1)
9	1925 (7)	1994 (1)
10	1925 (12)	1990 (1)
11	1923 (1)	1994 (9)
12	1922 (1)	1993 (7)
Зима	1923 (1)	1994 (9)
Весна	1931 (4)	1993 (1)
Лето	1925 (8)	1993 (1)
Осень	1925 (8)	1992 (1)
Год	1923 (3)	1993 (1)

них скользящих интервалах показывает, что в последние 20 лет число «теплых» июней на 41 станции севернее 60° с.ш. увеличилось почти вдвое.

Особый интерес представляют изменения температуры воздуха над областью морской Арктики, включающей покрытую льдами в зимний период акваторию Северного Ледовитого океана (СЛО). Изменения температуры в этой области в первую очередь влияют на зимнее разрастание и летнее таяние ледяного покрова в СЛО. С этой точки зрения оценим изменения положительных летних температур как индикатора летнего теплового воздействия на лед и отрицательных температур за холодный период года, влияющих на максимальное увеличение объема льда зимой. Для этого используем данные 41 станции, расположенных на островах и побережье Северного Ледовитого океана (см. рис. 1), откуда начинается летнее отступление морских арктических льдов.

Средняя за зимние (ноябрь–март) и летние (июнь–август) месяцы приповерхностная температура воздуха (ПТВ) на станциях в морской Арктике показана, начиная с 1951 года, на рис. 6. Видно быстрое убывание отрицательных температур после 1991 года и быстрый рост положительных температур после 1996 года с абсолютным рекордом в 2007 году и понижением в 2008 году. При этом зимние температуры до 1991 года и летние до 1996 года имели слабые отрицательные тренды, которые сменились на значимые положительные тренды.

Таким образом, потепление в морской Арктике развивалось неравномерно и, в основном, с середины 1990-х гг. Наибольшее число значительных положительных аномалий ПТВ отмечалось в теплую половину года с июня по октябрь в последнее десятилетие. Предшествующие относительно теплые летние сезоны отмечались в 1960-е годы.

При сравнении потепления в Арктике с глобальными потеплением или потеплением в низких широтах, отмечают его максимальное развитие, названное Арктическим усилением изменений климата. Арктическим усилением можно рассматривать и как усиление изменчивости характеристик климата (Алексеев, Священников, 1991), прежде всего ПТВ, и как усиление тренда ПТВ, например, на потепление (Polyakov et al., 2002). Между этими двумя определениями усиления можно записать зависимость в виде

$$a_1/a_2 = (\sigma_1/\sigma_2)(R_1/R_2),$$

где a – коэффициент тренда, σ – среднее квадратическое отклонение, R – коэффициент детерминации, 1,2 – разные области.

При совпадении коэффициентов детерминации тренда в обеих областях усиление зависит только от изменчивости, которая в первом приближении зависит от интенсивности воздухообмена между широтными областями и объема атмосферы над ними (Алексеев, Священников, 1991). Основными причинами арктического усиления, помимо летнего сокращения площади льда, которое приводит к усилению тренда ПТВ в осенние месяцы с максимумом в ноябре, являются увеличение переноса тепла в высокие широты и изменение радиационных притоков тепла в сторону увеличения потока нисходящей длинноволновой радиации вследствие роста содержания водяного пара в арктической атмосфере (рис. 7).

Следует отметить, что первое наблюдавшееся потепление Арктики 1920–40-х гг. привлекло внимание исследователей еще в период своего развития в первой половине XX столетия. В работах В.Ю. Визе (1924, 1937, 1941) потепление Арктики в 1920–1930 гг. характеризуется как наиболее сильное по своим размерам климатическое колебание, зарегистрированное на тот момент метеорологическими летописями. Визе пришел к заключению, что потепление явилось следствием усиления общей циркуляции атмосферы на земном шаре, с которым связана ак-

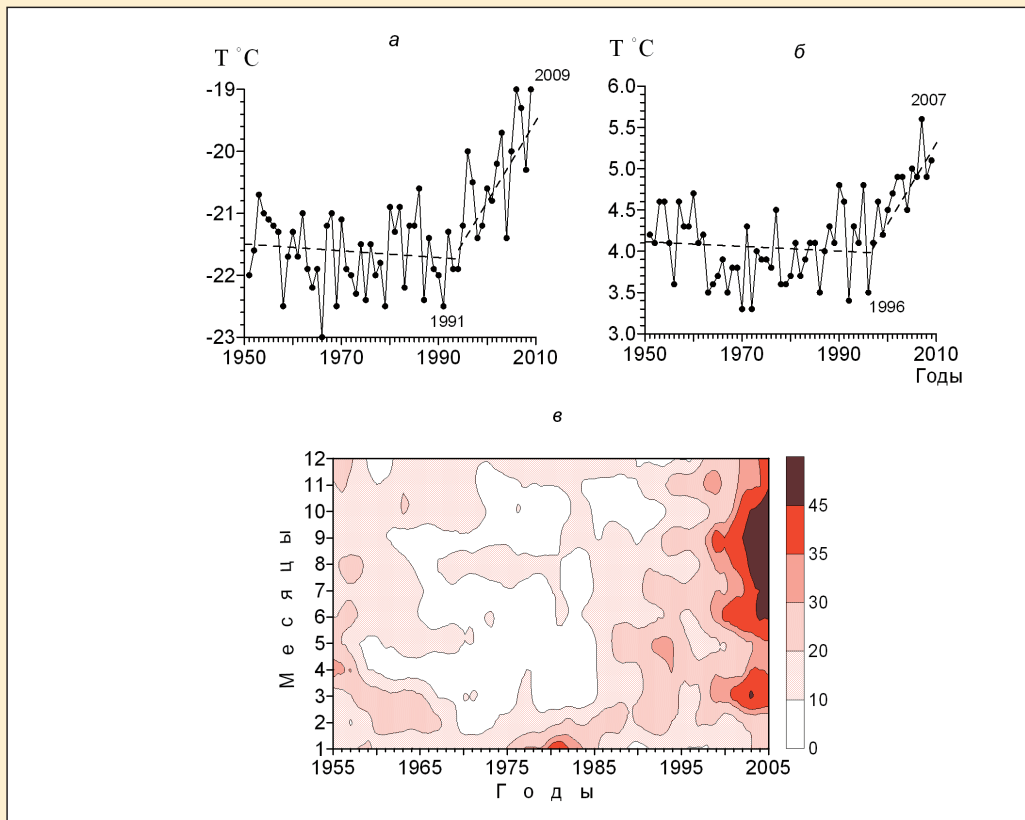


Рис. 6. а – средние зимние (XI–III), б – летние (VI–VIII), в – число выходов среднемесячной ПТВ за 95% уровень, суммированное по скользящим 9-летиям на 41 станции в морской Арктике в 1951–2008 гг.

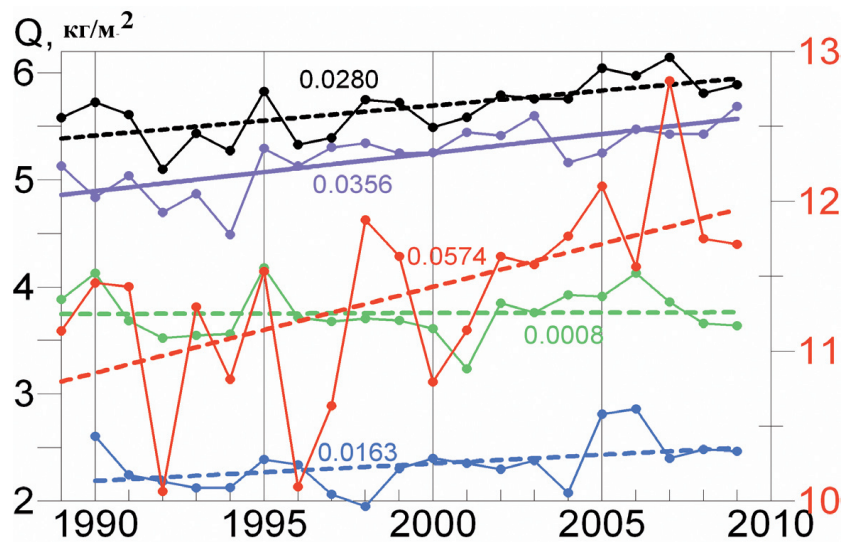


Рис. 7. Общее содержание водяного пара в атмосфере к северу от 70° с.ш. в разные сезоны и в среднем за год в 1989–2009 гг. по данным (ERA-40, <http://www.ecmwf.int>). Цифры означают коэффициент тренда