

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В МОРСКОЙ АРКТИКЕ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

*д-р геогр. наук Г.В.АЛЕКСЕЕВ, науч. сотр. Н.Е.ИВАНОВ,
науч. сотр. А.В.ПНЮШКОВ, мл. науч. сотр. А.А.БАЛАКИН*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, alexgv@aari.ru

Анализируются аномалии состояния арктической климатической системы в первое десятилетие XXI века и в период проведения МПГ 2007/08 в сравнении с состоянием атмосферы, морских льдов и океана в Арктике в предшествующий период. Изменения в Арктическом бассейне сравниваются с изменениями в Северной Атлантике.

Ключевые слова: изменения климата, морская Арктика, температура воздуха, морской лед, Арктический бассейн, Северная Атлантика, МПГ 2007/08.

В период МПГ 2007/08 по проекту ААНИИ «Комплексные исследования центральной части СЛО» проводились скоординированные широкомасштабные наблюдения в Арктическом бассейне с использованием научного судна ледокольного типа, вертолетов, дрейфующих станций. Одновременно выполнялись другие национальные и международные проекты, включавшие океанографические наблюдения с помощью стационарных и дрейфующих автономных устройств и измерения водообмена через проливы. В рамках проекта ААНИИ был выполнен также комплекс измерений структуры атмосферного погранслоя над льдом, газового состава и аэрозольных компонент, составляющих теплового баланса на поверхности Арктического бассейна.

Сравнение полученных результатов с результатами крупномасштабных наблюдений в 1970-е гг., 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 накопленными данными о состоянии водных масс, морских льдов и атмосферы, оказалось возможным проследить развитие климатического феномена конца 1990-х — начала 2000-х гг. в морской Арктике, его связь с изменениями глобального климата и сравнить с потеплением в 1930–1940-е гг.

Для оценки изменений приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в Арктике используем данные о среднемесячной температуре за столетний период на 30 станциях, расположенных севернее 60° с.ш. (рис. 1).

Такой выбор связан с тем, что существующие сеточные массивы данных о температуре с начала XX в. основаны на меняющемся во времени количестве арктических 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* [7]. 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 временных рядов, рассматриваемых как реализации в ансамбле. Сеточный массив *NCEP* использовался для дополни-

тельной верификации результатов анализа изменений температуры после 1950 г. Сравнение средних по станциям со средними по данным *NCEP* в соответствующих областях за этот период показало, что коэффициенты корреляции между рядами среднемесячных ПТВ находятся в пределах 0,81–0,90.

Изменения средней по 30 станциям приповерхностной температуры воздуха, а также средней по станциям в приатлантической и тихоокеанской половинах области, разделенных по меридианам 90–270° в.д., в каждый сезон и в среднем за год за столетний период 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 в тихоокеанской половине области сильнее, чем в атлантической. При этом оценки трендов неустойчивы к сдвигу начала ряда на более поздние годы. Коэффициенты тренда быстро убывают по мере приближения начала ряда к 1925 г. вплоть до смены знака тренда для зимы.

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

Сравнение двух потеплений в терминах порядковых статистик рядов среднемесячных данных на 41 станции (с 1921 г.) 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, используются для определения года, в который ПТВ в данном

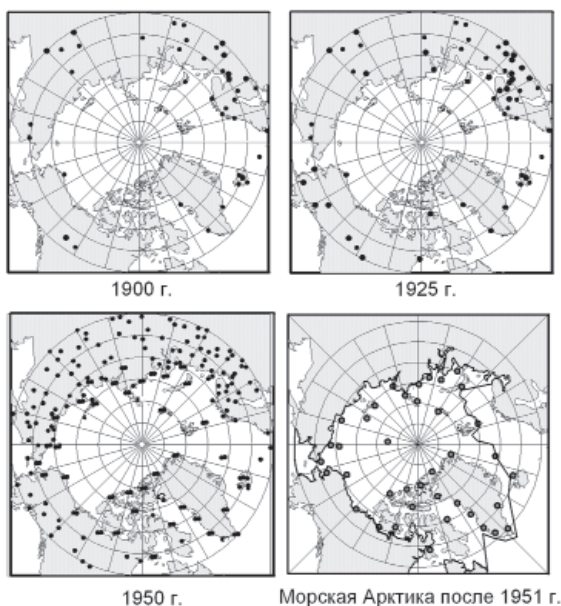


Рис. 1. Метеорологические станции в Северном полушарии севернее 60° с.ш. в разные периоды XX в. и в морской Арктике после 1951 г. [1]

месяце и на данной станции была ниже заданного квантиля x_p . Точно так же $x_{(i)}$, где $i = N(n(1 - p) + 1)$, используется для определения года, в который ПТВ выше x_{1-p} .

Суммирование отмеченных таким образом аномальных лет по всем станциям, состоящее в подсчете числа случаев, когда данный год попадал в выбранный интервал ($< x_p$ или $> x_{1-p}$), $p = 0,05$ 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

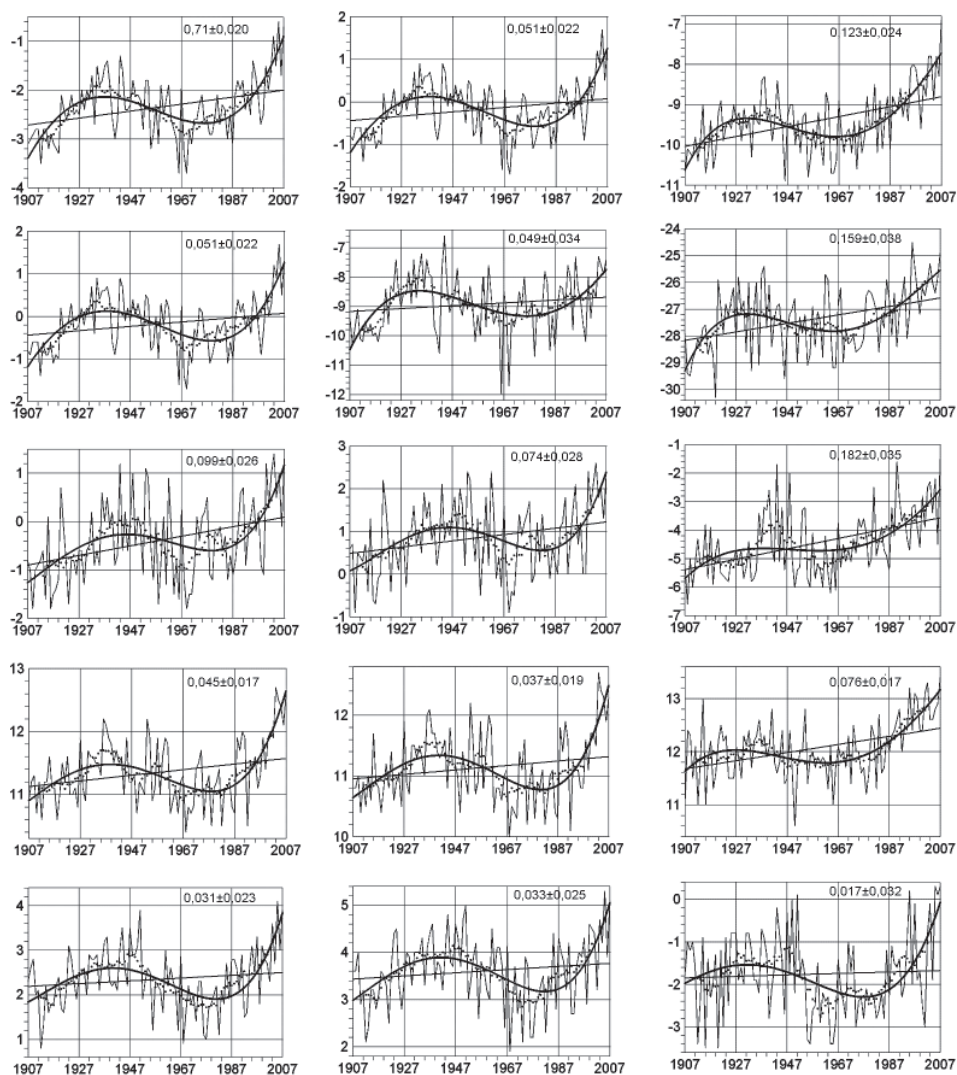


Рис. 2. Вековой ход ПТВ.

Сверху вниз: средняя за год, за ноябрь–март, апрель–май, июнь–август и сентябрь–октябрь приповерхностная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), осредненная по 30 станциям к северу от 60° с.ш. (левая колонка), по станциям в атлантической (центральная колонка) и тихоокеанской (правая колонка) половинах этой области. Прямая наклонная линия – тренд, точки – скользящие средние за 11 лет, жирная кривая линия – аппроксимация полиномом 4-ой степени. Цифрами даны значения коэффициента тренда и его стандартной ошибки, $^{\circ}\text{C}/10$ лет

достоверность и наглядность представления получаемых таким образом значений повторяемости, проводилось их суммирование внутри скользящих интервалов по 9 лет с отношением полученной суммы к середине интервала. Представление полученных значений на диаграмме (год, месяц) показывает эволюцию температурных условий в арктическом регионе на протяжении рассматриваемого периода в зависимости от месяца года (рис. 3).

Видно, что потепления выделяются увеличенной повторяемостью очень теплых месяцев и максимумов среднемесячной ПТВ с начала 1930-х до начала 1950-х гг. и с середины 1980-х гг. и до конца рассматриваемого периода. Причем в первый период сильнее теплели декабрь–февраль, май–июнь и сентябрь, а теплые октябрь отмечались в начале 1950-х гг. Во втором потеплении выделяются теплые февраль в первой половине 1990-х гг., а в 2000-х гг. – март–апрель, июль–август октябрь–декабрь. Заметно также потепление во второй половине 1950-х гг. с более теплыми мартом, маем и октябрем. Если просуммировать рассматриваемые повторяемости по сезонам и за год, то можно увидеть, что число теплых месяцев увеличилось в последнее десятилетие, причем быстрее всего летом и за год в целом.

На рис. 2 помимо положительного тренда в изменениях средней ПТВ в Арктике хорошо выражено долгопериодное колебание, формируемое потеплениями 1930–1940-х и 1990–2000-х гг. и понижением температуры в 1970-е гг. Предполага-

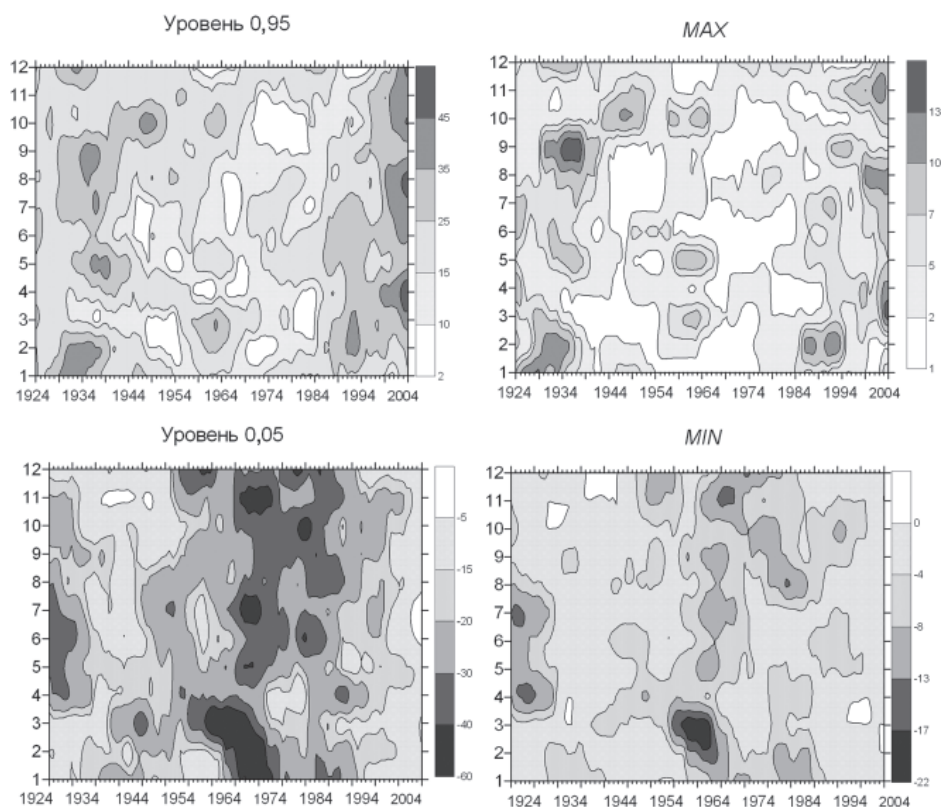


Рис. 3. Диаграммы повторяемости anomalously теплых и холодных месяцев

Верхний ряд: слева – распределение числа очень теплых (> 95 % уровня), справа – самых теплых месяцев; нижний ряд: слева – распределение числа очень холодных (< 5 % уровня), справа – самых холодных месяцев на 41 станции к северу от 60° с.ш. в скользящих 9-летних интервалах за 1921–2008 гг.

ется, что это проявление низкочастотного колебания естественного происхождения с периодом 60–70 лет [12, 16, 19]. Дисперсионный анализ ряда среднегодовой ПТВ для рассматриваемой области показывает, что на долю низкочастотного колебания (НЧК), 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 НЧК в изменчивость среднегодовой ПТВ весьма неравномерно (рис. 4). Наибольший вклад (от 22 до 45 %) отмечается на 7 станциях в гренландско-исландском районе, который и формирует вклад НЧК в изменения средней температуры в Арктике. Таким образом, выделенное низкочастотное колебание представляет собой известную атлантическую междесятилетнюю осцилляцию (АМО), поэтому будем далее использовать этот термин.

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 гг. (рис. 4в). Следует отметить, что изменения среднегодовой ПТВ в этом районе отличаются необычайно быстрым ростом в течение десятилетия 1920-х гг., не имеющим аналогов ни в одном другом регионе.

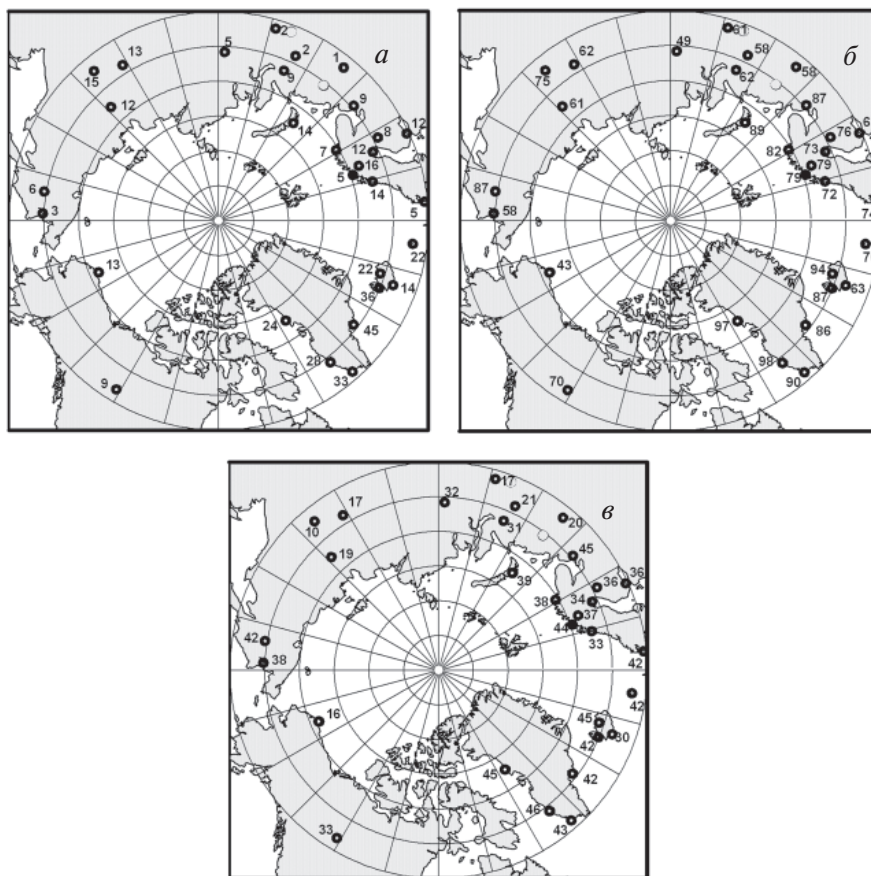


Рис. 4. Характеристики атлантической междесятилетней осцилляции АМО: *a* – вклад (%) АМО в изменения среднегодовой ПТВ, *б* – вклад (%) первой гармоники Фурье-разложения АМО, *в* – год максимума первой гармоники (две последние цифры после 19)

Другая особенность выделенного АМО в том, что рост ПТВ во втором его полупериоде (после 1970-х гг.) отличается от такового в первом полупериоде. 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 гг. свидетельствуют результаты экспериментов с глобальными моделями климата при неизменном и растущем содержании CO_2 в атмосфере [14]. Расхождения между средней (глобальной, полушарной, региональной) ПТВ при постоянной концентрации и при растущем содержании CO_2 начинаются как раз в середине 1970-х гг. Исходя из этого, усиление АМО оценим как разность между максимальными вкладами 31-летних трендов, аппроксимирующих рост ПТВ на стадии развития обоих потеплений. Разность максимальных вкладов тренда, измеряемых регрессионной суммой квадратов, в последнем и первом потеплениях отнесем к максимальному вкладу тренда в последнее потепление:

$$K_a = [(S_{tr2} - S_{tr1}) / S_{tr2}] \times 100 \%,$$

где K_a – усиление АМО, %, S_{tr2} и S_{tr1} – регрессионные суммы (дисперсионный вклад тренда, умноженный на 31). В случае превышения S_{tr1} над S_{tr2} , разность относим к S_{tr1} . В этом случае K_a характеризует ослабление вклада АМО во втором потеплении.

В табл. 1 приведены результаты расчета для каждого сезона и среднегодовой ПТВ во всей области к северу от 60° с.ш. и ее атлантической и тихоокеанской половин, разделенных по меридиану $90-270^\circ$. В соответствии с полученными оценками зимой нет усиления АМО ни в одной области. В остальные сезоны АМО усиливается как в целом в рассматриваемой области, так и в обеих ее половинах

Таблица 1

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

Вся область										
	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
Коэф. 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 ($270-90^\circ$ д.)										
Период	1908–1938	1978–2008	1907–1937	1979–2009	1909–1939	1978–2008	1919–1940	1978–2008	1908–1938	1979–2009
Коэф. 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 ($90-270^\circ$ д.)										
Период	1908–1938	1977–2007	1908–2008	1965–1995	1914–1934	1979–2009	1902–1932	1978–2008	1901–1931	1979–2009
Коэф. 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 %	

(за исключением осени в атлантической половине области). При этом наибольшее усиление приходится на лето. В среднегодовой ПТВ усиление потепления значительно в тихоокеанской половине области, практически отсутствует в атлантической половине и незначительно во всей области. Если отнести причину отмеченного усиления на счет антропогенного роста содержания CO_2 , то его вклад в среднем за год невелик, но весьма значителен летом и весной.

Заключение об усилении тренда ПТВ в последнее 31-летие в теплую половину года по сравнению с трендом в зимние месяцы подтверждается сравнением рангов коэффициентов тренда за оба 31-летних периода. В ноябре, декабре и январе первое потепление развивалось значительно интенсивнее по сравнению с последним потеплением, а в наиболее теплые месяцы – в июне и июле – тренд во второй период был намного сильнее. Особенно велико различие в скорости потепления в июне. Изменение числа «теплых» ($T > 95\%$ уровня) месяцев в 9-летних скользящих интервалах показывает, что последние 20 лет число «теплых» июней на 40 станциях севернее 60° с.ш. увеличилось почти вдвое.

Для анализа изменений температуры воздуха над областью морской Арктики, включающей покрытую льдами в зимний период акваторию Северного Ледовитого океана (СЛО), используем данные 41 станции, расположенных на островах и побережье СЛО (рис. 1б). Такие данные в полном объеме имеются с 1951 г. [1].

Средняя за зимние (ноябрь–март) и летние (июнь–август) месяцы ПТВ на станциях в морской Арктике показана на рис. 5а, б. Видно быстрое убывание от-

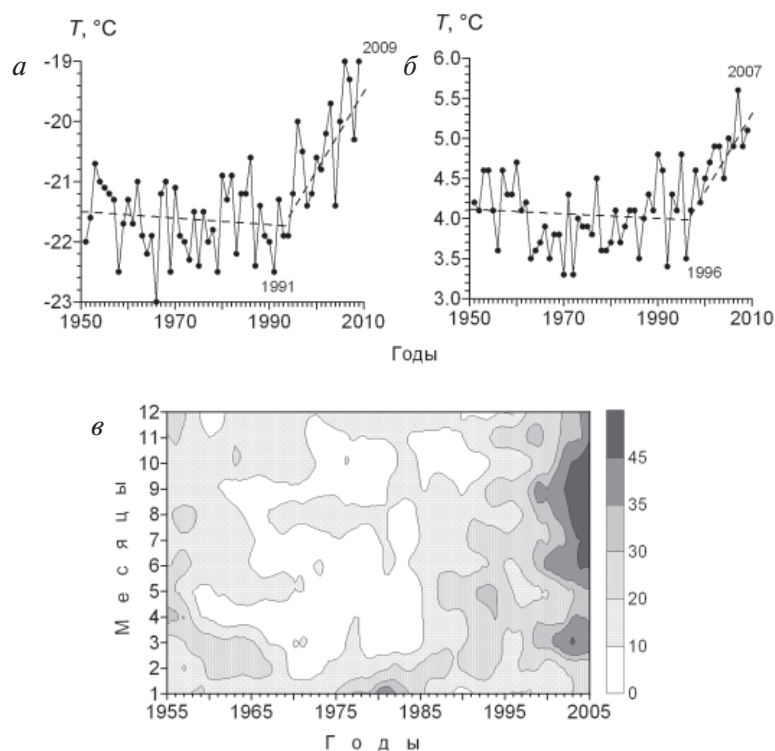


Рис. 5. Временные ряды сезонной ПТВ и диаграмма повторяемости anomalously теплых и холодных месяцев на 41 станции в морской Арктике в 1951–2008 гг.:

a – средние зимние (ноябрь–март), *б* – средние летние (июнь–август) ПТВ, *в* – число выходов средне-месячной ПТВ на станциях за 95 % уровень, суммированное по скользящим 9-летиям

рицательных температур после 1991 г. и быстрый рост положительных температур после 1996 г. с абсолютным рекордом в 2007 г. При этом зимние температуры до 1991 г. и летние до 1996 г. имели слабые отрицательные тренды, которые сменились на значимые положительные тренды.

Таким образом, потепление в морской Арктике развивалось неравномерно, в основном с середины 1990-х гг. Предшествующие относительно теплые летние сезоны отмечались в 1960-е гг. Этот вывод подтверждается изменениями ПТВ по данным *NCEP*, которые имеются с 1948 г. [18].

Во взаимодействии между Арктикой и остальной частью глобальной климатической системы важную роль принадлежит морскому ледяному покрову, который в то же время является индикатором изменений арктического климата. Наблюдаемое с начала 1980-х гг. постепенное сокращение летней площади морского льда (ПМЛ) в Арктике резко ускорилось в конце 1990-х гг. и достигло абсолютного минимума в сентябре 2007 г. (4,28 млн км² [16]). В 2008 и 2009 гг. произошло увеличение, которое в сентябре 2010 г. должно смениться уменьшением ПМЛ (рис. 6а). Заметим, что эти межгодовые колебания воспроизводятся авторегрессионными моделями, построенными на основе главных компонент годового хода ПМЛ в Северном полушарии с заблаговременностью до 2 лет. Соответствующие расчетные изменения ПМЛ показаны на рис. 6 а вместе с данными наблюдений.

В зимний период морские льды покрывают большую часть СЛО и распространяются к югу на опресненные акватории морей на континентальном шельфе [5]. В сибирских арктических морях (моря Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) зимой лед занимает практически всю акваторию. К сентябрю лед отступает на наибольшее расстояние от побережья. Многолетние изменения в этот период дают наиболее полное представление о воздействии потепления на ПМЛ в этом районе (рис. 6 б).

Очевидно, что причина столь резкого сокращения количества арктических льдов в конце летнего периода связана с потеплением климата. Чтобы количественно оценить эту связь, рассмотрим корреляцию между изменениями летней приповерхностной температуры воздуха и площадью, занятой морским льдом в сентябре. В качестве индекса летнего потепления используем среднюю температуру воздуха в июне–сентябре на станциях, расположенных на побережье и островах в морской Арктике. Связь между изменениями этого индекса и ПМЛ в сентябре усиливается по мере развития потепления и характеризуется наибольшей корреляцией $-0,90$

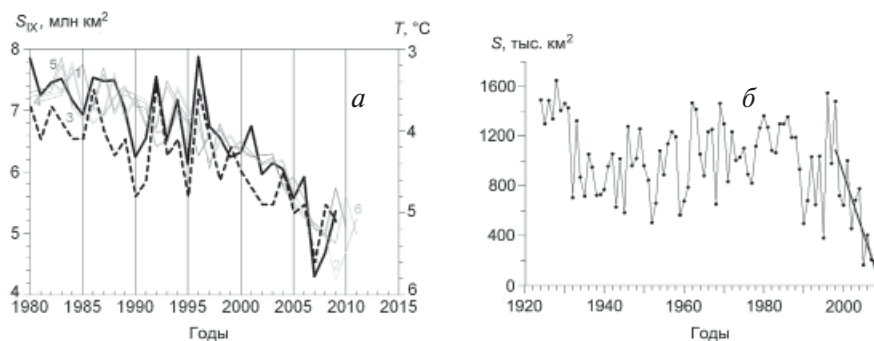


Рис. 6. Временные ряды площади морского льда ПМЛ:

a – арктический морской лед в сентябре по данным NSIDC [16], тренд за 1998–2008 гг. составляет 38 %, сплошные жирные линии представляют результаты расчетов ПМЛ по авторегрессионным моделям, пунктир – средняя температура воздуха в июне–августе в морской Арктике; *б* – морской лед в сентябре в Сибирских арктических морях, тренд за 1998–2008 гг. равен 79 %

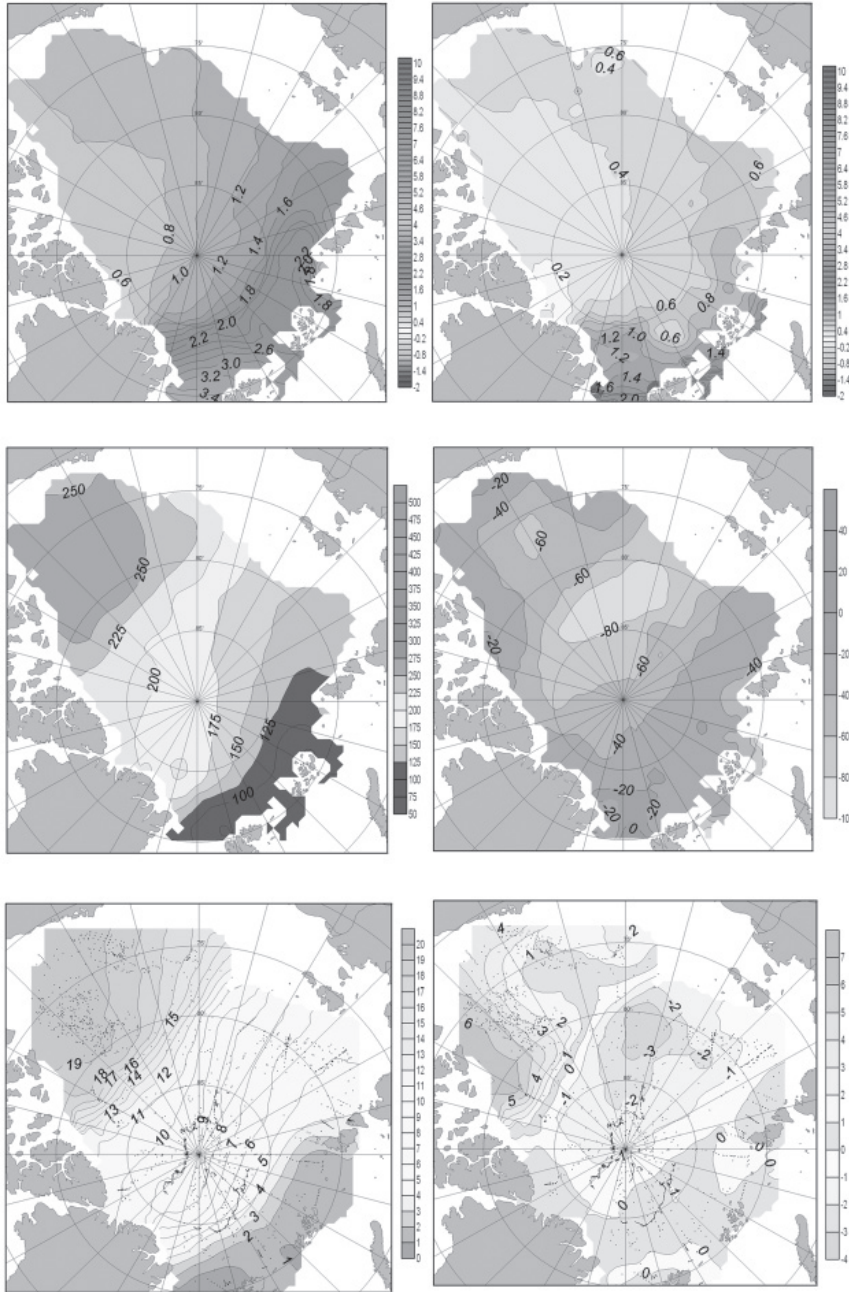


Рис. 7. Океанографические характеристики атлантической воды в начале XXI в. Сверху вниз: слева – максимальная температура в слое АВ, глубина верхней границы слоя (нулевой изотермы), содержание пресной воды (пресноводный эквивалент, м) в слое выше изохалины 34,80 ‰ по данным океанографических наблюдений в Арктическом бассейне в 2000–2008 гг.; справа – аномалии относительно средних полей за 1970-е гг. по данным атласа EWG [13]

для ряда ПМЛ по спутниковым данным за 1979–2009 гг. (рис. 6а). Корреляция между суммой отрицательных зимних температур воздуха и ПМЛ в марте слабее, поскольку разрастание площади льдов зимой ограничено берегами и границей распространения слоя опресненной воды в высоких и умеренных широтах Атлантического и Тихого океанов [5].

Результаты расчетов будущего арктических морских льдов на глобальных моделях климата представлены во многих публикациях, включая четвертый оценочный доклад МГЭИК [14]. Наблюдаемое сокращение площади льда значительно опережает модельные реализации. Основная причина расхождений в оценке изменений площади льда между моделями и наблюдениями в том, что модели значительно занижают летнюю температуру воздуха в Арктике вследствие, по-видимому, недостаточной чувствительности к изменениям радиационного воздействия и с занижением интенсивности собственной изменчивости климатической системы в Арктике [2].

Для формирования климата морской Арктики важным процессом является поступление теплой и соленой воды из Северной Атлантики, которая служит источником тепла в приатлантическом секторе Арктики и источником соли для арктических вод, подвергающихся постоянному опреснению. Поэтому мониторинг притока и распространения атлантической воды (АВ) в Арктическом бассейне составляет часть слежения за изменениями климата Арктики [4, 15, 17].

Благодаря активным международным экспедиционным исследованиям в 1990-е и особенно в 2000-е гг., получившим особый размах в период МПГ 2007/08, были получены обширные океанографические данные в разных районах Арктического океана. В этот же период стала поступать океанографическая информация с дрейфующих океанографических буев. В итоге значительное число океанографических станций покрыло почти всю акваторию Арктического бассейна, что позволяет построить средние океанографические поля за десятилетия 1990-х, 2000-х гг. и в период МПГ и сравнить их с полями 1970-х гг., наиболее полно освещенными данными наблюдений в прошлом [5]. Метод построения полей и поля по данным за 2007 г. представлены в статье [3]. На рис. 7 показаны поля океанографических характеристик слоя АВ за 2000–2008 гг. — период максимального на данный момент развития потепления.

Наибольшее потепление в слое АВ в рассматриваемый период произошло в основном потоке АВ вдоль материкового склона, а верхняя граница слоя поднялась повсеместно, но более всего (на 60–80 м) в центральной части Арктического бассейна. Вследствие этих изменений в вертикальной структуре водных масс тол-

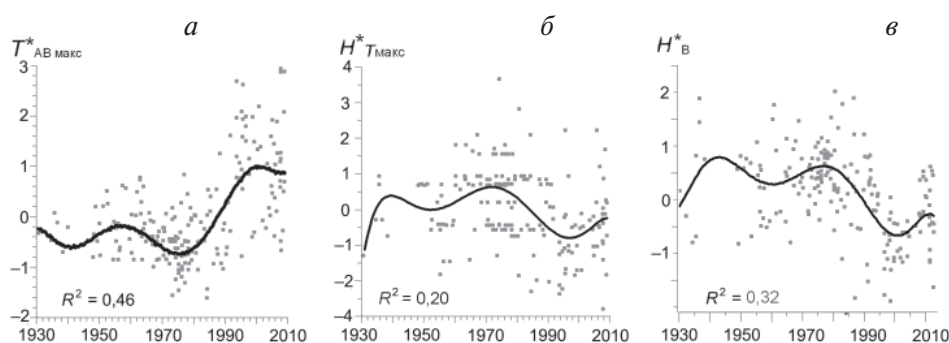


Рис. 8. Нормированные аномалии характеристик слоя АВ, обобщенные по 5 районам Арктического бассейна:

a — максимальная температура воды, *б* — глубина максимума температуры, *в* — глубина верхней границы слоя (нулевой изотермы)

щина верхнего опресненного слоя арктической воды уменьшилась над областями максимального потепления и подъема верхней границы слоя АВ, и, как следствие, здесь уменьшилось содержание пресной воды в слое над изохалиной 34,80 ‰. Произошло перераспределение «избытка» пресной воды в верхнем слое Арктического бассейна, в результате которого увеличилось ее количество в акватории, прилегающей к островам Канадского архипелага и Аляски, что ведет к увеличению стока пресной воды через проливы в Канадском архипелаге.

Обобщение океанографических данных, собранных в Арктическом бассейне с начала наблюдений, позволило выбрать районы, наиболее освещенные наблюдениями, и сформировать климатические ряды характеристик АВ по 2009 г. включительно. Одной из таких характеристик является максимальная температура в слое АВ в шести районах Арктического бассейна, представленная в [3]. На рис. 8 показаны обобщенные по пяти районам в Арктическом бассейне (без пролива Фрама) нормированные (на СКО) аномалии (относительно соответствующих средних за период наблюдений), максимальная температура в слое АВ, глубина максимальной температуры и положение верхней границы слоя.

Несмотря на значительный разброс нормированных аномалий, аппроксимация ортогональными полиномами выделяет междесятилетние колебания характеристик с соответствующими экстремумами. Максимумы температуры АВ приходятся на 1930-е, 1950-е и 1990–2000-е гг. Соответствующие им минимумы глубины максимальной температуры и глубины верхней границы слоя АВ приходятся на эти же периоды.

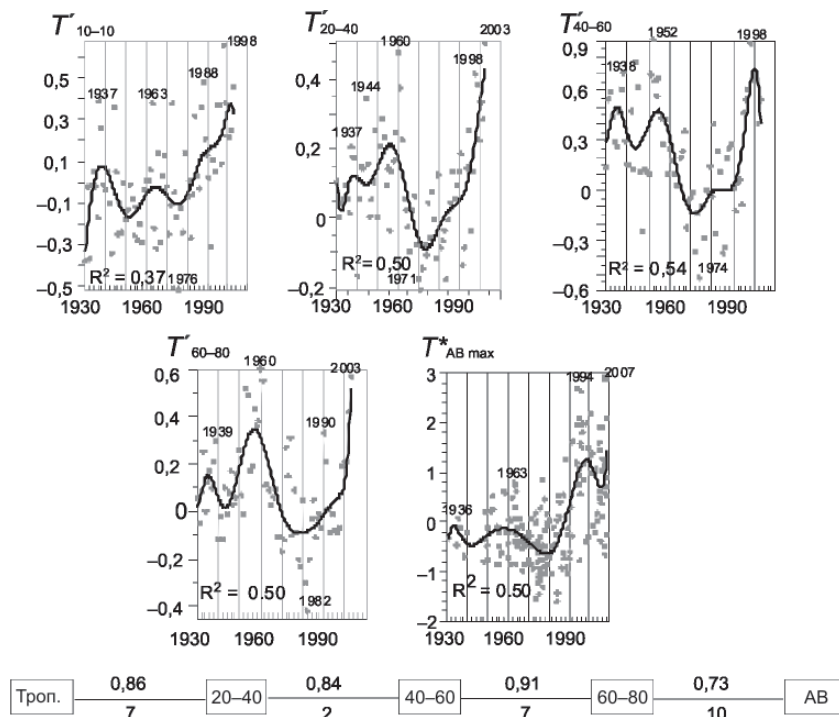


Рис. 9. Аномалии среднегодовой температуры воды в 4 районах на поверхности Северной Атлантики (слева направо: 10° ю.ш.–10° с.ш., 20–40° с.ш., 40–60° с.ш., 60–80° с.ш.) по данным HadSST [21] и обобщенные нормированные аномалии максимальной температуры АВ в Арктическом бассейне. На каждом графике указан коэффициент детерминации (R^2) и отмечены годы экстремальных значений. Под графиками аномалий показаны коэффициенты корреляции между ними после 11-летнего скользящего осреднения (сверху) и соответствующие им запаздывания в годах (внизу), найденные для всего ряда 1870–2003 гг.

Сопоставление изменений характеристик АВ в Арктическом бассейне с изменениями температуры воды на поверхности Северной Атлантики от тропиков до Северо-Европейского бассейна обнаруживает здесь подобные междесятилетние колебания, постепенно распространяющиеся в Атлантике с юга на север (рис. 9).

Суммирование запаздываний дает общее время перемещения аномалий из тропиков в Арктический бассейн в 26 лет. В то же время во всех районах экстремальные аномалии приходятся на близкие годы и отмечается сходный рост положительных аномалий в последние три десятилетия. По-видимому, запаздывание связано с переносом аномалий крупномасштабной океанической циркуляцией, а близкие по времени аномалии возникают под влиянием глобальных внешних воздействий, ответственных, в том числе, за потепление последних десятилетий.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Потепление в морской Арктике развивалось с начала 1990-х гг., ускорилось в 2000-е гг. и более всего проявилось в летние месяцы.

В этот же период ускорилось сокращение летней площади льда и повышение температуры воды в слое АВ в Арктическом бассейне.

В изменчивости температуры воздуха в атлантической части Арктики более 30 % составляет вклад 60-летнего колебания (АМО). Усиление АМО на фазе его роста в последние три десятилетия, предположительно за счет антропогенного фактора, наибольшее летом и отсутствует зимой.

Глобальные модели недооценивают летнее потепление и, как следствие, летнее сокращение площади льда в Арктике.

Изменения в состоянии водных масс Арктического бассейна в слое воды атлантического происхождения связаны с процессами в Мировом океане.

Исследования, результаты которых представлены в статье, выполнены в рамках кластера проектов ААНИИ по программе МПГ «Комплексные исследования центральной части Северного Ледовитого океана», целевой научно-технической программы Росгидромета на 2008–2010 гг. и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 06-05-64054, 07-05-13358 офи-и, 09-05-00232).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Е.И., Брызгин Н.Н., Дементьев А.А., Радионов В.Ф. Мониторинг климата приземной атмосферы северной полярной области // Труды ААНИИ. 2007. Т. 447. С. 18–32.
2. Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М., Кузьмина С.И., Иванов Н.Е. Морские льды Северного полушария в связи с изменениями климата в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Известия АН, сер. ФАО. 2009. Т. 45. № 6. С. 723–735.
3. Алексеев Г.В., Пнюшков А.В., Иванов Н.Е., Ашик И.М., Соколов В.Т. Комплексная оценка климатических изменений в морской Арктике с использованием данных МПГ 2007/08 // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 7–14.
4. Алексеев Г.В., Фролов И.Е., Соколов В.Т. Наблюдения в Арктике не подтверждают ослабление термохалинной циркуляции в Северной Атлантике // Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 2. С. 277–280.
5. Захаров В.Ф. Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 214 с.
6. Константинов Ю.Б., Грачев К.И. Высокоширотные воздушные экспедиции «Север» (1937, 1941–1993 гг.) / Под ред. В.Т.Соколова. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 176 с.
7. Кораблев А.А., Пнюшков А.В., Смирнов А.В. К вопросу о возможности использования данных реанализов ERA-40 и NCEP/NCAR для оценки изменений климата в северной полярной области // Труды ААНИИ. 2007. Т. 447. С. 44–67.
8. Формирование и динамика современного климата Арктики / Под ред. проф. Г.В.Алексеева. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 27–46.

9. Фролов С.В., Федяков В.Е., Третьяков В.Ю., Клейн А.Э., Алексеев Г.В. Новые данные об изменении толщины льда в Арктическом бассейне // Докл. РАН. 2009. Т. 425. № 1. С. 104–108.
10. Шутилин С.В., Макитас А.П., Алексеев Г.В. Модельные оценки ожидаемых изменений ледяного покрова СЛО при антропогенном потеплении в XXI веке // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 2 (79). С. 101–110.
11. Alekseev G.V., Johannessen O.M., Korablev A.A., Proshutinsky A.Y. Ocean and sea ice // Arctic Environment Variability in the Context of the Global Change / Edited by L.P.Bobylev, K.A.Kondratyev and O.M.Johannessen. Springer-Praxis, 2003. P. 107–236.
12. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Nagurny A.P., Ivanov N.E. Arctic sea ice data sets in the context of the climate change during the 20th century // Climate variability and extremes during the past 100 years. Series: Advances in Global Change Research. 2007. Vol. 33. P. 47–63.
13. Arctic Climatology Project. Environmental Working Group joint U.S. – Russian atlas of the Arctic Ocean – winter period / Edited by L.Timokhov and F.Tanis. Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan in association with the National Snow and Ice Data Center, 1998. CD-ROM.
14. Climate Change 2007: The Physical Science Basis // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 p.
15. Delworth T.L., Manabe S., Stouffer R.L. Multidecadal climate variability in the Greenland Sea and surrounding regions: a coupled model simulation // Geophys. Res. Lett. 1997. Vol. 24. P. 257–260.
16. NSIDC. URL: http://nsidc.org/data/seaice_index/index.html [дата посещения 25.11.2010].
17. Kalnay E., Cai M. Impact of urbanisation and land-use change on climate // Nature. 2003. Vol. 423. P. 528–531.
18. Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fahrbach E., Frolov I.E. et al. One more step toward a warmer Arctic // Geophys. Res. Lett. 2005. 32. L17605, doi:10.1029/2005GL023740.
19. Polyakov I., Johnson M.A. Arctic decadal and interdecadal variability // Geophys. Res. Lett. 2000. Vol. 27. P. 4097–4100.
20. Polyakov I.V., Timokhov L., Walsh D., Dmitrenko I., Colony R.L., Johnson M., Carmack E., Hutchings J.K. A long-term circulation and water mass monitoring program for the Arctic Ocean // EOS Transactions. 2003. Vol. 84. P. 281–285.
21. Rayner N.A., Brohan P., Parker D.E., Folland C.K., Kennedy J.J., Vanicek M., Ansell T., Tett S.F.B. Improved analyses of changes and uncertainties in marine temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: the HadSST2 dataset // J. Climate. 2006. No. 19. P. 446–469.
22. Schlesinger M. E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // Nature. 1994. № 367. P. 723–726.

G.V.ALEKSEEV, N.E.IVANOV, A.V.PNUSHKOV, A.A.BALAKIN

CLIMATE CHANGE IN THE MARINE ARCTIC IN THE EARLY XXI CENTURY

Climate anomalies in the Arctic atmosphere, sea ice and ocean during first decade of XXI century are estimated and compared with ones in previous decades. Changes in the Arctic Ocean are compared with changes in the North Atlantic.

Keywords: climate changes, marine Arctic, air temperature, sea ice, Arctic ocean, North Atlantic, IPY 2007/08.