

УДК 551.582: 551.583

ПРОЯВЛЕНИЕ И УСИЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ В АРКТИКЕ

Г.В. Алексеев

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт»,
Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38, alexgv@aari.ru

Резюме. В статье представлены оценки изменений климата Арктики в период развития современного глобального потепления и рассмотрена роль различных факторов в арктическом усилении этих изменений. Показано, что в 1990 годах начался рост приповерхностной температуры воздуха, достигший максимума в 2012г. Одновременно происходило ускоренное сокращение арктического морского ледяного покрова в конце летнего периода, завершившееся самым глубоким минимумом в сентябре 2012г. При этом изменения летней температуры воздуха в морской Арктике и площади льда в сентябре согласованы между собой с коэффициентом корреляции равным -0,93 за 1980-2014гг. Квадратичная и линейная модели связи между летней температурой и площадью льда указали на период 2029-2037гг., когда может произойти исчезновение льда в сентябре. Зимой на изменения площади льда влияют приток теплой и соленой атлантической воды и смещения границы ее распространения в приатлантической Арктике, особенно заметные в Баренцевом море. Показано, что наибольший вклад в потепление арктического климата вносит атмосферный перенос тепла по направлению к полюсу, определивший почти 90% тренда средней температуры в Арктике, большую часть тренда средней за год температуры Северного полушария и более половины тренда глобальной температуры за 1969-2008гг.

Ключевые слова. Арктика, изменения климата, глобальное потепление, арктическое усиление.

DEVELOPMENT AND AMPLIFICATION OF GLOBAL WARMING IN THE ARCTIC

G.V. Alekseev

Arctic and Antarctic Institute,
Beringa str., 38, 199397, St.-Petersburg, Russia, alexgv@aari.ru

Summary. The paper presents the evaluation of climate change in the Arctic during the development of the global warming, and considers the role of various factors in the Arctic amplification of changes. It is shown that the increase of surface air temperature began in the 1990's and reached its peak in 2012. Rapid

reduction of the Arctic sea ice cover at the end of the summer period occurred concurrently and reached the deepest minimum in September 2012. The changes of summer air temperature in the marine Arctic and sea ice extent in September correlate with the coefficient equals to -0,93 for 1980-2014. Quadratic and linear models of relationships between the summer air temperature and sea ice extent indicate the period 2029-2037 as that of September ice disappearance. The inflow of warm and salty Atlantic water and displacement of its limits distribution in the sub-Atlantic Arctic, especially noticeable in the Barents Sea, influence changes of the winter sea ice extent. It is shown that the greatest contribution to amplified warming of the Arctic climate is that of the poleward atmospheric heat transport. This transport accounts for almost 90% of the trend in average temperature in the Arctic, most of the trend of average temperature in the Northern Hemisphere and more than half of the global mean temperature trend from 1969-2008.

Keywords: Arctic, climate change, global warming, arctic amplification.

Введение

Климат Арктики формируется в условиях значительно меньшего притока тепла от Солнца, чем климат неполярных областей. Отчасти этот дефицит восполняется внутренними термодинамическими процессами, протекающими как в климатической системе в целом, так и в морской Арктике.

Наибольший вклад в потепление арктического климата по сравнению с гипотетическим климатом при неподвижной и прозрачной атмосфере, вносит адвекция тепла по направлению к полюсу. Благодаря этому процессу климат Арктики в районе Северного полюса «теплеет» почти на 60 К по сравнению с климатом при отсутствии адвекции, в то время как парниковый эффект атмосферы повышает приповерхностную температуру воздуха здесь на более, чем в два раза меньшую величину (рис. 1).

Из рисунка видно, что при переходе от термического режима, соответствующего лучистому равновесию в неподвижной «прозрачной» атмосфере ($\delta = \delta_0$ и $k = 0$) к термическому режиму при $\delta = \delta_1$ и $k = k_1$ («современный» климат), средняя температура полушария увеличивается на 32,98 К, из которых на долю парникового эффекта приходится около 90%, остальное повышение (чуть больше 10%) происходит за счет включения меридионального переноса в атмосфере. У полюса вклад меридионального переноса в формирование «современного» термического режима составляет 77%, а на долю парникового эффекта приходится 23% при общем повышении температуры на полюсе на 86,28 К по сравнению с неподвижной «прозрачной» атмосферой.

Диаграммы показывают, что меридиональный перенос усиливает на 0,45 К парниковый эффект в средней температуре полушария и на 9 К полярный парниковый эффект. В свою очередь, парниковый эффект усиливает вклад меридионального переноса в суммарный «разогрев»

атмосферы. У экватора основной вклад в повышение температуры вносит парниковый эффект, а усиление меридионального переноса ведет к снижению температуры и ослаблению парникового эффекта (в модели отсутствует перенос через экватор).

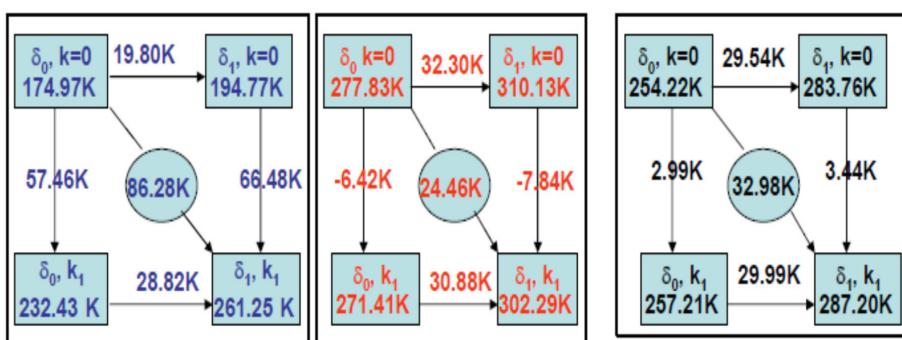


Рисунок 1 – Диаграммы изменений температуры на полюсе, экваторе и средней по полуширью (слева направо) в энергобалансовой модели климата в экспериментах с разными значениями интегральной прозрачности атмосферы (δ) и коэффициента макродиффузии (k) (Алексеев, Подгорный, 1991; Алексеев, 2014 а).

Разность температуры у экватора и полюса возрастает при уменьшении прозрачности в неподвижной атмосфере, но более чем в два раза убывает при включенном меридиональном переносе в прозрачной атмосфере. Парниковый эффект вновь увеличивает эту разность, но в меньшей степени. Таким образом, контраст температуры между экватором и полюсом реагирует на изменения меридионального переноса тепла и, следовательно, отражает влияние меридионального переноса на среднюю температуру.

В морской Арктике, составляющей часть Северного Ледовитого океана, покрываемую льдом зимой (Алексеев и др., 2009; Алексеев, 2014б), изменения климата под влиянием колебаний меридионального переноса тепла усиливаются обратными связями, среди которых особое внимание привлекает деградация морских льдов в Северном Ледовитом океане (СЛО), остро реагирующих на изменения климата.

Анализ исторических данных о морских арктических льдах обнаруживает значительные изменения в распространении льдов. В.Ф. Захаров (2004) выделяет в XX столетии четыре стадии в развитии морских арктических льдов: две стадии разрастания (1900-1918 и 1938-1968гг.) и две стадии сокращения ледяного покрова (1918-1938 и 1968-1999гг.), выраженные на фоне векового сокращения площади арктических льдов.

Обобщение данных инструментальных наблюдений за морскими льдами со спутников после 1978 года показывают сокращение их протяженности, ускорившееся за последние два десятилетия (напр., Фролов и др., 2007; Алексеев и др., 2009, 2012; Johannessen et al., 2004; Stroeve et al., 2007; Comiso et al., 2008; Kwok, Rothrock, 2009; Stroeve et al., 2011; Иванов и др., 2013; Алексеев и др., 2015).

В.Ю. Визе (1937) первым указал на усиление циркуляции атмосферы и океана как на основную причину арктического потепления в 1930-40 годы и, как следствие, сокращения морского ледяного покрова в приатлантической Арктике от западной Гренландии до Карского моря зимой и в Баренцевом и Карском морях летом. Очевидно, что причина наблюдаемого в настоящее время сокращения количества арктических льдов также связана с потеплением климата, на что указывает корреляция между изменениями летней приповерхностной температурой воздуха и площадью, занятой морским льдом в сентябре с коэффициентом за 1979-2012 гг. равным -0,94 (Алексеев, 2013).

Влияние атмосферной циркуляции на изменения климата в Арктике подтверждается расчетами вклада атмосферных переносов в формирование ее энергетического баланса. Как показывают оценки (Марчук и др., 1988; Nakamura, Oort, 1988; Хрол, 1992; Serreze et al., 2007), меридиональный перенос тепла в атмосфере составляет основную часть энергетического баланса для климатической системы Земля – атмосфера в высоких широтах Северного полушария (рис. 2). Вследствие этого усиление атмосферной циркуляции и повышение температуры воздуха здесь тесно связаны между собой.

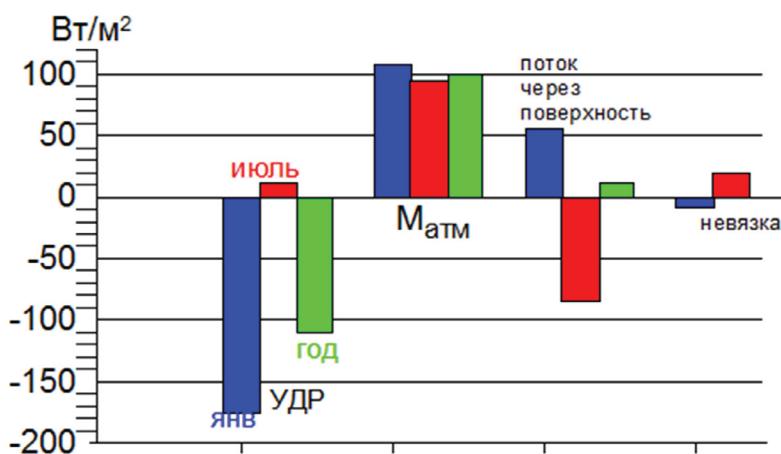


Рисунок 2 – Составляющие энергетического баланса атмосферы к северу от 70°с.ш., рассчитанные по данным реанализов ERA-40 (NCEP/NCAR) (Serreze et al., 2007). УДР – радиационный баланс на верхней границе атмосферы, $M_{\text{атм}}$ – меридиональный приток энергии через 70°с.ш.

Отрицательный поток через поверхность летом является результатом поглощения тепла на таяние льда и снега и на прогрев верхнего опресненного слоя. Зимой это тепло поступает в атмосферу при охлаждении и замерзании воды в верхнем слое океана. Его величина увеличилась по сравнению с более ранними оценками, что связано с сокращением площади морских льдов и увеличением летнего прогрева верхнего слоя.

Цель настоящей статьи – представить оценки происходящих в Арктике изменений климата в период развития современного глобального потепления как продолжение более ранних изменений и определить роль различных факторов, в первую очередь, меридионального переноса, в арктическом усилении наблюдаемого потепления.

Происходящие изменения в арктической климатической системе

Приповерхностная температура воздуха (ПТВ) используется как один из основных показателей изменения климата в высоких широтах Северного полушария. Метеорологические наблюдения здесь начались еще в 19-ом столетии на нескольких станциях, расположенных севернее 60°с.ш., (Александров, Дементьев, 1995). Однако, достаточно надежная оценка средней ПТВ в этой области возможна с начала 20-го столетия, когда число станций увеличилось.

На рисунке 3 показаны средние ПТВ на 32 станциях за зимние и летние месяцы. Прослеживается развитие потепления в 1910-1940гг., прерванное глубоким понижением ПТВ до 1970 гг., после которого началось современное потепление. Эти три стадии эволюции ПТВ образуют колебание с периодом около 60 лет, проявляющееся на станциях в приатлантической области от западной Гренландии до Баренцева моря (Алексеев и др., 2011), в изменениях площади морских арктических льдов (Фролов и др., 2007; Miles et al., 2014), которые связаны с Атлантической междесятилетней осцилляцией (AMO): Enfield et al., 2001; Chylek et al., 2009).

Можно заметить на рисунке слева, что ПТВ в первое потепление зимой была практически одинаковой с ПТВ при современном потеплении, в то время как летом (на правом рисунке) ПТВ в современное потепление значительно превысило летнюю ПТВ при первом потеплении.

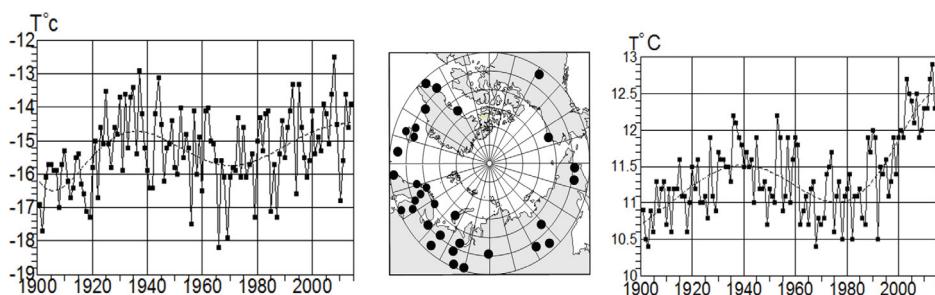


Рисунок 3 – Средняя ПТВ на 32 станциях к северу от 60°с.ш. (в центре) зимой (декабрь – февраль, слева) и летом (июнь–август, справа) в 1901–2014гг. Пунктир – полином 6-й степени.

Изменения температуры воздуха над областью морской Арктики, включающей покрытую льдами в зимний период акваторию Северного Ледовитого океана (СЛО) представляют особый интерес, поскольку, в первую очередь, влияют на летнее таяние и зимнее разрастание ледяного

покрова в СЛО. На рис. 4 видно быстрое убывание отрицательных температур после 1991 года и быстрый рост положительных температур после 1996 года с абсолютным рекордом в 2012 году. После 2012 года температура понижается в оба сезона.

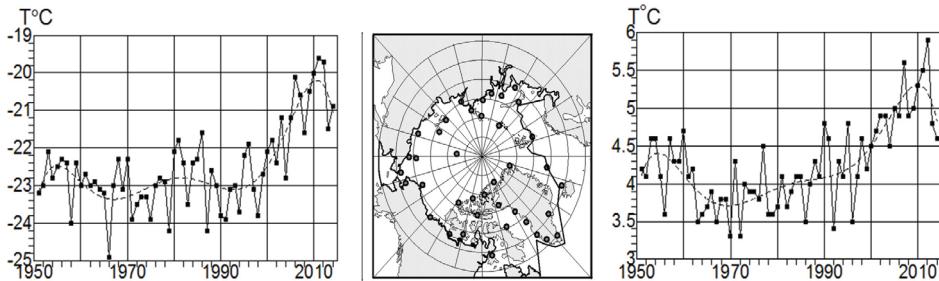


Рисунок 4 – Изменения средней температуры воздуха в морской Арктике в 1951-2014 гг. Слева – зимой, справа – летом. В центре – положение станций. Пунктир – полином 6 степени.

Сокращение площади арктического морского льда (ПМЛ) является наиболее обсуждаемым проявлением глобального потепления в Арктике. Современный период сокращения ПМЛ хорошо документирован по данным измерений со спутников. Произведенные на их основе комплекты ледовых карт и временные ряды различных характеристик морского ледяного покрова показывают изменения площади, занятой льдами в Арктике. В последние полтора десятилетия происходило ее быстрое сокращение в конце летнего периода, завершившееся самым глубоким минимумом в сентябре 2012 года: 3,37 млн. кв. км при среднем значении более 6 млн. кв.км. Подобного сокращения площади льдов не наблюдалось ранее за период не только инструментальных, но любых случайных и попутных наблюдений со времен появления современного человека в высоких широтах.

Очевидно, что причина резкого сокращения количества арктических льдов в конце летнего периода связана с потеплением климата. Чтобы количественно оценить эту связь, рассчитана корреляция между изменениями летней приповерхностной температурой воздуха в морской Арктике и площадью, занятой морским льдом в сентябре. Коэффициент корреляции по данным за 1979-2014 гг. составил -0,93, что свидетельствует о почти функциональной зависимости между летней ПТВ и сентябрьской ПМЛ (рис. 5).

В зимний сезон многолетний тренд указывает на уменьшение ПМЛ в Арктике значительно более медленное по сравнению с летним сокращением, хотя скорость роста ПТВ зимой по абсолютной величине превышает тренд летней ПТВ. Одна из причин заключается в том, что зимой отсутствует вклад арктических морей, полностью покрываемых льдом, в сокращение ПМЛ. Поэтому изменения максимальной зимней ПМЛ в Арктике связаны с изменениями положения кромки морского льда в ее приатлантической части, где максимальное распространение льда определяется гра-

ницей между распредненой водой арктического происхождения и соленой, и теплой атлантической водой (Захаров, 1978; 1981). Соответственно изменчивость максимальной ПМЛ в Арктике наряду с короткопериодными колебаниями, связанными с воздействием атмосферной циркуляции, содержит составляющую, определяемую колебаниями притока теплой и соленой атлантической воды, и смещениями границы ее распространения.

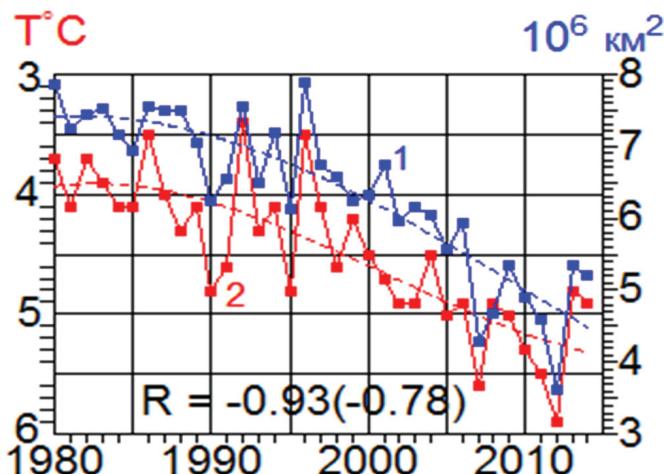


Рисунок 5 – 1 – площадь, занятая морским арктическим льдом в сентябре по данным NSIDC (<http://www.nsidc.colorado.edu>). 2 – средняя приповерхностная температура воздуха в июне-августе в морской Арктике. Пунктир – полином 2-й степени. R – коэффициент корреляции между (1) и (2) за 1980-2014 гг., в скобках – то же между отклонениями от аппроксимирующих полиномов.

Влияние этой составляющей на зимнюю ПМЛ хорошо заметно в Баренцевом море, где имеются данные о морских льдах с 1928 года (данные ААНИИ) и о температуре воды на разрезе по Кольскому меридиану с 1900 года (данные ПИНРО <http://www.pinro.ru/n22/index/phpstructure/labs/labhidro>). Корреляция между изменениями среднемесячной ПМЛ в Баренцевом море и температуры воды на разрезе по Кольскому меридиану достигает 0,86 в мае после достижения площадью льда зимнего климатического максимума.

Такое распределение связи между температурой воды на разрезе и площадью льда объясняется тем, что в начале зимы лед в Баренцевом море начинает формироваться в северной части моря под значительным влиянием атмосферной циркуляции, что приводит к значительным межгодовым колебаниям площади льда в этот период. В то же время теплая вода, поступающая в южную часть моря, препятствует распространению льда на юг, максимум которого приходится на апрель. Тем самым усиление или ослабление притока теплой воды, отражаемое наблюдениями на разрезе, определяет ее распространение по акватории

моря и влияет на положение максимальной южной границы льдов в Баренцевом море.

Одна из обратных связей, усиливающих потепление в Арктике в результате сокращения ПМЛ, проявляется в усилении положительного тренда температуры воздуха поздней осенью и в начале зимы (рисунок 6). В этот период, начинающийся переходом температуры воздуха к отрицательным значениям, в атмосферу поступает тепло, накопленное в освободившихся ото льда акваториях, площадь которых росла по мере развития потепления. Дополнительный вклад в усиление потепления вносит повышение содержания водяного пара в приповерхностном слое воздуха, сопровождающееся увеличением притока нисходящей длинноволновой радиации.

Период 1993-2013гг. для оценки трендов выбран потому, что в эти годы развивалось быстрое повышение ПТВ. Максимальные тренды ПТВ приходятся на декабрь-январь месяцы, их превышение над фоновым значением за февраль-сентябрь соответствует 75% вкладу усиления тренда в эти месяцы с участием рассматриваемого механизма.

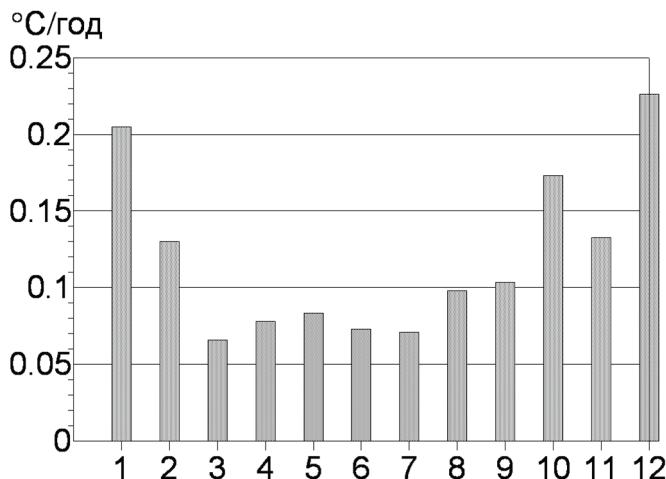


Рисунок 6 – Коэффициенты линейного тренда приповерхностной температуры воздуха в морской Арктике за 1993-2012гг.

Тесная связь между повышением температуры воздуха летом и сокращением площади льда в сентябре позволяет выполнить экстраполяцию эволюции сентябрьской площади льда, используя статистическую модель этой зависимости. Наряду с этим приемом можно экстраполировать и наблюдаемую площадь льда в сентябре, что повышает достоверность экстраполяции в случае совпадения результатов обоих методов. Рисунок 7 показывает результаты применения обоих методов экстраполяции и подтверждает их совпадение в указании на возможное исчезновение льда в сентябре к середине 2030 гг., что укладывается в

диапазон оценок исчезновения льда в расчетах по глобальным моделям климата (Павлова, Катцов, 2013; Overland and Wang, 2013).

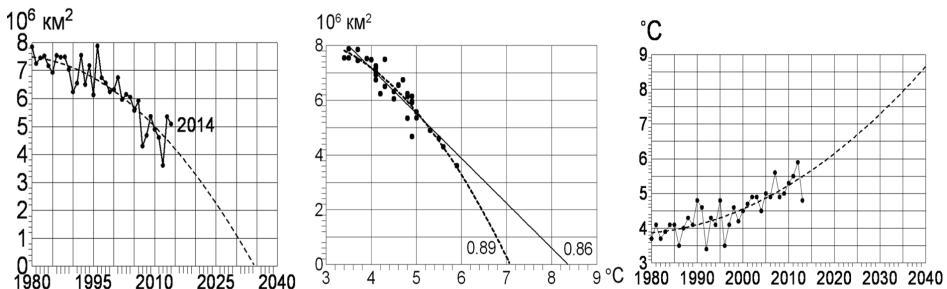


Рисунок 7 – Слева – экстраполяция полиномом 2 степени площади льда (к-т детерминации 0,78) в сентябре до его исчезновения около 2035г.; в центре – линейная (к-т детерминации 0,85) и квадратичная (к-т 0,89) экстраполяция зависимостей между летней температурой и площадью льда в сентябре, показывающая температуру, при которой лед исчезнет (8,4 и 7,1°C); справа – квадратичная экстраполяция (к-т детерминации 0,65) летней температуры воздуха, указывающая на достижение 7,1 и 8,4°C около 2027 и 2038гг., соответственно.

Оценка роли меридионального переноса в атмосфере в усилении потепления в Арктике.

Исследованию влияния на формирование климата и его изменений меридиональной составляющей переносов тепла и ее изменчивости под влиянием внутренней динамики атмосферы и естественных и антропогенных воздействий, уделялось особое внимание (обзор в ст. Алексеев, 2014а). Здесь мы используем результат, полученный на энергобалансовой модели климата о репрезентативности изменений температурного контраста между низкими и высокими широтами в качестве индикатора изменений меридионального переноса в атмосфере.

На этом основании предложен (Алексеев и др., 1990, 1991) индекс для оценки влияния колебаний меридионального переноса на среднюю ПТВ. Индекс характеризует неоднородность распределения ПТВ вдоль меридиана от экватора до полюса:

$$D_M = \left\langle (T_\varphi - \langle T_\varphi \rangle)^2 \right\rangle_\varphi, T_\varphi = \langle T_{\varphi\lambda} \rangle_\lambda, \langle T_\varphi \rangle = \langle T_\varphi \rangle_\varphi$$

Угловые скобки обозначают осреднение по широте (φ) или долготе (λ). Средние квадраты отклонения ПТВ от соответствующих средних входят в определение доступной потенциальной энергии в атмосфере (Лоренц, 1970; Ван Мигем, 1977):

$$A_E = \int_{atm} \frac{1}{2} \gamma c_p [(T')^2] dm$$

В таблице 1 представлены коэффициенты корреляции между индексом D_M и средней температурой высоких широт Северного полушария в разные сезоны года и в среднем за год. Они показывают сильную обратную зависимость между неоднородностью распределения среднезональной температуры вдоль меридиана и средней температурой высоких широт, которая усиlena весной и осенью. Это усиление можно объяснить ослаблением влияния на меридиональный контраст зонального переноса между сушей и океаном в эти сезоны. Подобное распределение связи между индексом и температурой характерно и для расчетов по глобальной модели.

Таблица 1 – Корреляция между индексом D_M и средней температурой в области $67,5-87,5^{\circ}\text{с.ш.}$ по данным NCEP за 1948-2010 гг.

сезон	год	зима	весна	лето	осень	R^2
год	-0,88	-0,67	-0,65	-0,25	-0,77	0,77
зима	-0,68	-0,79	-0,45	0,03	-0,49	0,62
весна	-0,83	-0,59	-0,9	-0,34	-0,62	0,81
лето	-0,65	-0,37	-0,5	-0,67	-0,61	0,45
осень	-0,82	-0,55	-0,54	-0,22	-0,86	0,74

Высокая корреляция индекса D_M наблюдается и со средней температурой воздуха на всем Северном полушарии и на Земном шаре в целом (рис.8), что можно рассматривать как подтверждение динамического усиления глобальных изменений температуры воздуха.

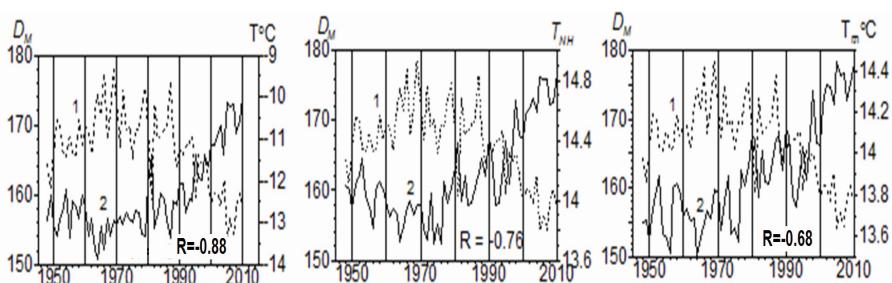


Рисунок 8. Слева направо – изменения индекса D_M (1) и средней годовой температуры воздуха (2) в высоких широтах ($67,5-87,5^{\circ}\text{с.ш.}$), в Северном полушарии и на Земле в целом, рассчитанные по данным реанализа NCEP.

R – коэффициент корреляции индекса D_M и соответствующего ряда температуры.

В пространственном распределении коэффициента корреляции между средними за зиму D_M и температурой на Северном полушарии, заданной в узлах регулярной сетки (рис. 9) выделяется дипольная структура потепления в Арктике и умеренных широтах с максимумом над Евразией и похолоданием в субтропическом поясе с экстремумом над Северной Африкой при уменьшении меридионального контраста в распределении температуры (усилении меридионального переноса). Заметно также понижение температуры в области Эль-Ниньо и в районе Северо-западной Атлантики и прилегающей части Северной Америки.

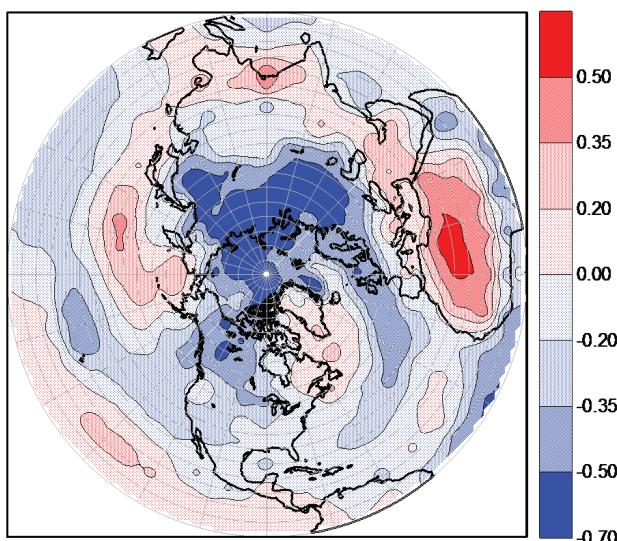


Рисунок 9 – Корреляция между зимними значениями индекса меридионального переноса D_M и температурой воздуха зимой в Северном полушарии, рассчитанная по данным NCEP за 1948-2010гг.

Используя связь между индексом меридионального переноса и средней температурой разных областей, оценим вклад переноса в потепление этих областей после 1969 года. В этот год были отмечены самые низкие средние температуры в зимний период в средних широтах Северного полушария, после чего началось повышение температуры воздуха.

Индекс D_M отражает меридиональный перенос тепла (явного и скрытого) циркуляцией атмосферы, влияющий на изменения меридионального контраста температуры воздуха. Кроме того, некоторый вклад в формирование изменений температурного контраста вносит перенос тепла океанской циркуляцией и обратные связи, возникающие при усилении или ослаблении переносов. Поскольку вклад обратных связей в формирование контрастов также является следствием усиления переносов, то можем считать индекс обобщенным показателем влияния переносов на среднюю температуру рассматриваемых областей.

Оценки влияния меридионального переноса на потепление (тренд средней температуры) могут быть получены в соответствии с формулами:

$$T_M = \beta_{DT} D_M$$

$$T_M = \beta_{DT} (\alpha_M t + D'_{M'})$$

$$\alpha_{MT} = \beta_{DT} \alpha_M$$

$$\alpha_T = \alpha_{MT} + \alpha_{RT}$$

где:

T_M – часть изменений температуры, определяемая переносом;

β – к-т регрессии;

α_M – коэффициент тренда D_M ;

α_{MT} – тренд температуры, связанный с D_M ;

α_{RT} – с другими причинами.

Вклад переноса в тренд температуры определен как

$$C_M = \frac{\alpha_{MT}}{\alpha_T} \cdot 100\% .$$

Результаты расчета C_M представлены на рис. 10.



Рисунок 10 – Вклад усиления меридионального переноса (%) в тренд средней температуры воздуха в 1969-2008гг., рассчитанный по данным реанализа NCEP. Слева направо – в высоких широтах ($67.5 - 87.5^{\circ}\text{с.ш.}$), на Северном полушарии, для Земного шара в целом.

Из рисунка видно, что рост индекса меридионального переноса в Северном полушарии вносит основной вклад в тренд средней температуры в высоких широтах, составляющий около 80% во все сезоны, кроме лета и почти 90% в тренд средней за год температуры. Этот вклад составляет большую часть трендов средней за сезоны (кроме лета) и за год температуры Северного полушария и более половины тренда глобальной температуры средней за год, зиму и осень.

Заключение

В многолетних изменениях приповерхностной температуры воздуха в Арктике с 1901 по 2014гг. выделяется колебание с периодом около 60 лет, соответствующее Атлантической междесятилетней осцилляции в температуре воды на поверхности Северной Атлантики.

Изменения приповерхностной температуры воздуха над областью морской Арктики, включающей покрытую льдами в зимний период акваторию Северного Ледовитого океана, характеризуются повышением зимних температур после 1991г. и ростом летних температур после 1996г. с абсолютным максимумом в 2012г.

В последние 15 лет происходило ускоренное сокращение арктического морского ледяного покрова в конце летнего периода, завершившееся самым глубоким минимумом в сентябре 2012г., после которого площадь льда увеличилась.

Летняя приповерхностная температура воздуха в морской Арктике интегрирует влияние разных факторов на сокращение площади льда, поэтому изменения приповерхностной температуры воздуха и площади льда согласованы с коэффициентом корреляции между ними за 1980-2014гг. равным -0,93.

Квадратичная и линейная модели связи между изменениями температуры и площади льда объясняют почти 90% изменчивости площади льда в Арктике в сентябре за 1980-2014гг. Обе модели указывают на период 2029-2037гг., в который может произойти исчезновение льда в конце летнего сезона при сохранении наблюдаемых темпов потепления.

На изменения площади арктического морского льда зимой влияют приток теплой и соленой атлантической воды и смещения границы ее распространения в приатлантической Арктике, особенно заметные в Баренцевом море. Корреляция между температурой воды и площадью льда в мае составляет здесь 0,86 за 1951-2009гг. Это объясняется тем, что теплая атлантическая вода поступает в южную часть моря и зимой препятствует распространению льда к югу, максимум которого приходится на апрель-май месяцы.

Наибольший вклад в потепление арктического климата вносит атмосферный перенос тепла по направлению к полюсу. При усиении переноса пространственные контрасты приповерхностной температуры воздуха уменьшаются и, наоборот, при ослаблении – возрастают. На этом основании были предложен индекс для оценки влияния меридионального переноса на среднюю температуру воздуха в Арктике, на полушарии и на Земле в целом.

Рост меридионального переноса вносит основной вклад в тренд средней температуры в Арктике за 1969-2008гг., составляющий около 80% во все сезоны, кроме лета и почти 90% в тренд средней за год температуры. Этот вклад определяет и большую часть трендов средней за сезоны (кроме лета) и за год температуры Северного полушария и более половины тренда глобальной температуры, средней за год, зиму и осень.

Благодарности

В статье использованы результаты исследований, выполненных при поддержке Минобрнауки (соглашение №14.610.21.0006, ИД RFMEFI61014X0006), гранта РФФИ 15-05-03512 и ЦНТП Росгидромета (темы 1.3.1.1, 1.5.3.7). Автор благодарит Н.Е. Иванова, Н.Е. Харланенкову за проведение расчетов и помочь в подготовке рисунков. Данные реанализа NCEP обеспечены NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, на сайте <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>, данные о площади, занятой морским льдом на Северном полушарии обеспечены NSIDC на сайте (<http://www.nsidc.colorado.edu>), данные о температуре воды на разрезе по Кольскому меридиану обеспечены ПИНРО <http://www.pinro.ru/n22/index/phpstructure/labs/labhidro/>.

Литература

- Александров Е.И., Дементьев А.А. 1995. База приземных метеорологических данных полярных районов и ее использование // В кн.: Формирование базы данных по морским льдам и гидрометеорологии. –СПб.: Гидрометеоиздат, с. 67-75.
- Алексеев Г.В. 2003. Исследования изменений климата Арктики в XX столетии. Тр. ААНИИ., т.446, с. 6-21.
- Алексеев Г.В. Потепление в морской Арктике – настоящее и будущее. –М.: Метеоспектр, 2013, №3, с. 92-95.
- Алексеев Г.В. 2014а. Динамическое усиление глобального потепления. Труды международной конференции памяти академика А.М.Обухова. –М.: ГЕОС, 2014, стр. 290-306.
- Алексеев Г.В. 2014б. Арктическое измерение глобального потепления. Лед и снег. 2014, №2, с.53-68.
- Алексеев Г.В., Е.И. Александров, Н.И. Глок, Н.Е. Иванов, В.М. Смоляницкий, Н.Е. Харланенкова, А.В. Юлин. 2015. Эволюция площади морского ледяного покрова Арктики в условиях современных изменений климата. «Исследование Земли из космоса», №2 (в печати).
- Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М., Кузьмина С.И., Иванов Н.Е. 2009. Морские льды Северного полушария в связи с изменениями климата в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Известия АН, Серия ФАО, т.45, №6, с. 723-735.
- Алексеев Г.В., Данилов А.И., Смоляницкий В.М. 2012. Летнее сокращение морских льдов в Арктике в 2012г. // Российские полярные исследования, №3 (9), с. 11-13.
- Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Харланенкова Н.Е. 2011. Климатические изменения в морской Арктике в начале XXI

века: Т. «Метеорологические и геофизические исследования». – М.: изд. «Европейские издания», с. 3-25.

Алексеев Г.В., Подгорный И.А. 1991. Роль адвекции и других факторов в формировании полярного климата // В кн.: Климатический режим Арктики на рубеже ХХ и ХХI вв. / Под ред. Б.А. Крутских, –СПб.: Гидрометеоиздат, с. 4-18.

Алексеев Г.В., Подгорный И.А., Священников П.Н. 1990. Адвективно-радиационные колебания климата // ДАН СССР, т. 315, №4, с. 824-827.

Ван Милем Ж. 1977. Энергетика атмосферы / Под ред. Л.Т. Матвеева, –Л.: Гидрометеоиздат, 327 с.

Визе В.Ю.1937. Причина потепления Арктики // Советская Арктика, № 1, с. 1-7.

Захаров В.Ф. 1978. Мировой океан и ледниковые эпохи плейстоцена. –Л.: Гидрометеоиздат, 64 с.

Захаров В.Ф. 1981. Льды Арктики и современные природные процессы. –Л.: Гидрометеоиздат, 136 с.

Захаров В.Ф. 2004. Внутри вековые изменения в распространении морских арктических льдов в XX столетии // В кн.: Формирование и динамика современного климата Арктики / Под. ред. Алексеева Г.В., –СПб.: Гидрометеоиздат, с. 112-159.

Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. 2013. Арктический ледяной покров становится сезонным? Исследование Земли из космоса, № 4, с.50-65.

Лоренц Э.Н. 1970. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. –Л.: Гидрометеоиздат, 259 с.

Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В. 1988. Радиационный баланс Земли, ключевые аспекты. –М.: Наука, 216с.

Павлова Т.В., Катцов В.М. 2013. Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей CMIP5. Тр. ГГО, 2013, т. 568, с. 7-35.

Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. 2007. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. –СПб.: Наука, 135 с.

Хрол В.П. 1992. Атлас энергетического баланса северной полярной области. –Л.: Гидрометеоиздат, 52 с.

Chylek, P., C.K. Folland, G. Lesins, M.K. Dubey, and M. Wang. 2009. Arctic air temperature change amplification and the Atlantic Multidecadal Oscillation, Geophys. Res. Lett., 36, L14801, doi:10.1029/2009GL038777.

- Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L. 2008. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // *Geophys. Res. Lett.* 35. L01703, doi:10.1029/2007GL031972.
- Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J. 2001. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. // *Geophys. Res. Lett.*, № 28, P. 2077-2080.
- Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P. 2004. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea ice variability // *Tellus*. 56A, P.328-341.
- Kwok R., Rothrock D.A. 2009. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958 – 2008. *Geophys. Res. Lett.* 36. L15501, doi:10.1029/2009GL039035.
- Miles, M.W., D.V. Divine, T. Furevik, E. Jansen, M. Moros, and A.E.J. Ogilvie. 2014. A signal of persistent Atlantic multidecadal variability in Arctic sea ice, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2013GL058084.
- Nakamura N., Oort A.H. 1988. Atmospheric heat budgets of the polar regions // *Journ. Geophys. Res.* 93(D8), P. 9510-9524.
- Overland J.E., Wang M. 2013. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? // *Geophys. Res. Lett.* 40. P.2097-2101, doi:10.1002/grl.50316.
- Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Steele M., Zhang J., Trenberth K.E. 2007. The large-scale energy budget of the Arctic *Journ. Geophys. Res.* № 112. D11122. doi:10.1029/2006JD008230.
- Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M. 2007. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophys. Res. Lett.* 34. L09501, doi:10.1029/2007GL029703.
- Stroeve J.C., Maslanik J., Serreze M.C., Rigor I., Meier W., Fowler C. 2011. Sea ice response to an extreme negative phase of the Arctic Oscillation during winter 2009/2010. *Geophys. Res. Lett.* №38. L02502. doi:10.1029/2010GL045662.