

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА АРКТИКИ ПРИ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ

*д-р геогр. наук Г.В. АЛЕКСЕЕВ, канд. геогр. наук В.Ф. РАДИОНОВ,
канд. геогр. наук Е.И. АЛЕКСАНДРОВ, науч. сотр. Н.Е. ИВАНОВ,
науч. сотр. Н.Е. ХАРЛАНЕНКОВА*

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

В статье представлены оценки изменений климата Арктики в период развития современного глобального потепления и рассмотрена роль различных факторов в арктическом усилении. Показано, что в 1990-х гг. начался рост приповерхностной температуры воздуха, достигший максимума в 2012 г. Одновременно происходило ускоренное сокращение арктического морского ледяного покрова в конце летнего периода, завершившееся самым глубоким минимумом в сентябре 2012 г. 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. Предполагается, что наибольший вклад в потепление арктического климата вносит атмосферный перенос тепла по направлению к полюсу.

Ключевые слова: Арктика, глобальное потепление, арктическое усиление.

ВВЕДЕНИЕ

Климат Арктики формируется в условиях значительно меньшего притока тепла от Солнца, чем климат неполярных областей. Отчасти 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 перенос 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 (Алексеев, 2014а; Алексеев, Подгорный, 1991).

В морской Арктике, составляющей часть Северного Ледовитого океана, покрываемую льдом зимой (Алексеев и др., 2012; Алексеев и др., 2009), изменения климата 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 (Захаров, 2004) выделяет в XX в. четыре стадии в развитии морских арктических льдов: две стадии разрастания (1900–1918 и 1938–1968 гг.) и две стадии сокращения ледяного покрова (1918–1938 и 1968–1999 гг.), выраженные на фоне векового

сокращения площади арктических льдов. Обобщение данных инструментальных наблюдений за морскими льдами со спутников после 1978 г. показывает сокращение их протяженности, ускорившееся за последние два десятилетия (Алексеев, 2014а; Алексеев и др., 2009; Алексеев и др., 2015; Иванов и др., 2013; Фролов и др., 2007; Comiso et al., 2008; Johannessen et al., 2004; Kwok, Rothrock, 2009; Stroeve et al., 2011; Stroeve et al., 2007).

В.Ю. Визе (Визе, 1937) первым указал на усиление циркуляции атмосферы и океана как на основную причину арктического потепления в 1930–1940-е гг. и, как следствие, сокращения морского ледяного покрова в приатлантической Арктике зимой и в Баренцевом и Карском морях летом. Очевидно, что причина наблюдаемого в настоящее время сокращения количества арктических льдов также связана с потеплением климата.

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; Хрол, 1992; Nakamura, Oort, 1988; Serreze et al., 2007), меридиональный перенос в атмосфере составляет основную приходную часть энергетического баланса для системы Земля — атмосфера в высоких широтах Северного полушария. Поэтому увеличение атмосферного переноса должно сопровождаться повышением температуры воздуха в Арктике и наоборот.

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 XIX в. на нескольких станциях, расположенных севернее 60° с.ш. (Александров, Дементьев, 1995). Однако достаточно надежная оценка средней ПТВ в этой области стала возможной с начала XX в., когда число станций увеличилось. На рис. 1 показаны средние ПТВ по данным наблюдений на 32 станциях в зимние и летние месяцы. Прослеживается развитие потепления в 1910–1940 гг., прерванное глубоким понижением ПТВ до 1970-х гг., после которого началось современное потепление. Эти три стадии эволюции ПТВ образуют колебание с периодом около 60 лет, проявляющееся на станциях в приатлантической части области от западной Гренландии до Баренцева моря (Алексеев и др., 2011), в изменениях площади морских арктических льдов (Miles et al., 2014), которые связаны с Атлантической междесятилетней осцилляцией, (Chylek et al., 2009; Enfield et al., 2001)).

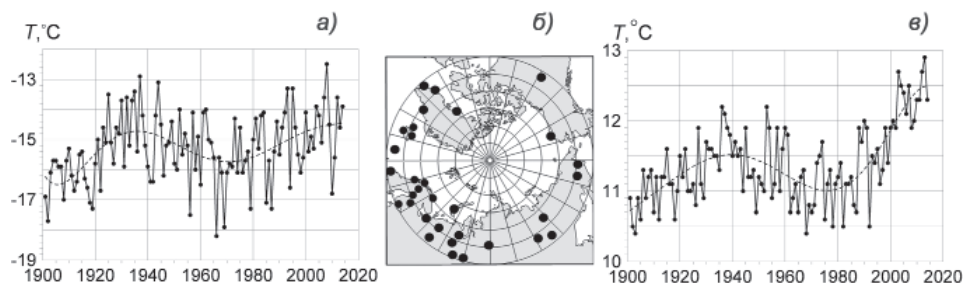


Рис. 1. Средняя ПТВ на 32-х станциях к северу от 60° с.ш. (б); зимой (декабрь–февраль, а) и летом (июнь–август, в) в 1901–2014 гг. Пунктир — полином 6-й степени.

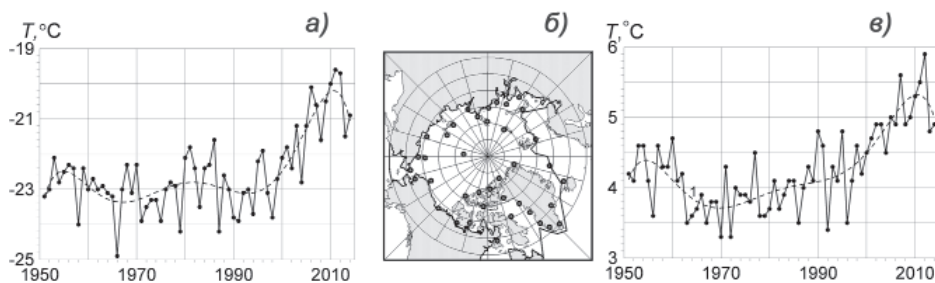


Рис. 2. Изменения средней температуры воздуха в морской Арктике в 1951–2014 г. *a* — зимой, *б* — летом, *в* — положение станций. Пунктир — полином 6-й степени.

Можно заметить на рисунке (*a*), что ПТВ в первое потепление зимой была практически одинаковой с ПТВ при современном потеплении, в то время как летом (*в*) ПТВ в современное потепление значительно превысила летнюю ПТВ в потепление 1930–1940-х гг.

Изменения температуры воздуха над областью морской Арктики, включающей покрытую льдами в зимний период акваторию Северного Ледовитого океана, представляют особый интерес, поскольку в первую очередь влияют на летнее таяние и зимнее разрастание ледяного покрова в СЛО. На рис. 2 видно, что быстрое повышение зимней температуры началось после 1998 г., а быстрый рост летней температуры — после 1996 г. с абсолютным рекордом в 2012 г. После 2012 г. температура начала понижаться в оба сезона.

Сокращение площади 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 г. (3,37 млн км² при среднем значении более 6 млн км²). Подобного сокращения площади льдов не только не наблюдалось ранее за период инструментальных измерений, но и не отмечалось при случайных и попутных наблюдениях в предшествующих (в течение нескольких веков) путешествиях и исследованиях в высоких широтах Арктики.

Очевидно, что причина резкого сокращения количества арктических льдов в конце летнего периода связана с потеплением климата. Чтобы количественно оценить эту связь, рассчитана корреляция между 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 (см. рис. 3).

В зимний сезон многолетнее уменьшение ПМЛ в Арктике значительно меньше по сравнению с его летним сокращением. Одна из причин этого заключается в том, что арктические моря каждую зиму полностью покрываются льдом, поэтому изменения максимальной зимней ПМЛ в Арктике связаны только с изменениями положения кромки морского льда в ее приатлантической части. Здесь максимальное распространение льда определяется границей между распресненной водой арктического происхождения и соленой и теплой атлантической водой (Захаров, 1978, 1981).

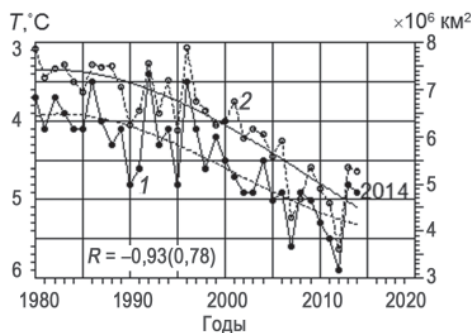


Рис. 3. Средняя приповерхностная температура воздуха в июне–августе в морской Арктике и площадь, занятая морским арктическим льдом в сентябре.

1 — температура воздуха; 2 — площадь, занятая льдом по данным NSIDC (<http://www.nsidc.colorado.edu>). Пунктир — полиномы 3-й степени. R — коэффициент корреляции между (1) и (2) за 1980–2014 гг., в скобках — то же между отклонениями от соответствующих полиномов.

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.

Влияние этой составляющей на зимнюю ПМЛ хорошо заметно в Баренцевом море, где имеются данные о морских льдах с 1928 г. (данные ААНИИ) и о температуре воды на разрезе по Кольскому меридиану с 1900 г. (данные ПИНРО: <http://www.pinro.ru/n22/index/phpstructure/labs/labhidro>). Корреляция между изменениями среднемесячной ПМЛ в Баренцевом море и изменениями температуры воды на разрезе по Кольскому меридиану достигает наибольшего значения 0,86 в мае, когда площадь ледяного покрова максимальна.

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 его части под существенным влиянием атмосферной циркуляции. Это 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. Тем самым усиление или ослабление притока теплой воды, распространяющейся по акватории моря, влияет на положение южной границы льдов в Баренцевом море.

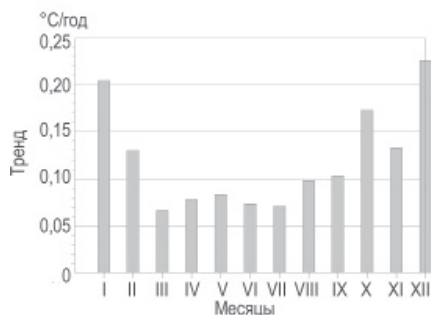


Рис. 4. Коэффициенты линейного тренда приповерхностной среднемесячной температуры воздуха в морской Арктике за 1993–2012 гг.

Одна из обратных связей, усиливающих потепление в Арктике в результате сокращения морского ледяного покрова, проявляется в ускорении роста температуры воздуха поздней осенью и в начале зимы (см. рис. 4). В этот период, начинающийся переходом температуры воздуха к отрицательным значениям, в атмосферу поступает тепло, накопленное в освободившихся в течение лета ото льда акваториях, площадь которых растет по мере развития потепления. Дополнительный вклад в усиление потепления вносит повышение содержания водяного пара в нижней тропосфере, сопровождающееся увеличением нисходящей длинноволновой радиации. Максимальные тренды ПТВ приходятся на декабрь и январь, их превышение над фоновым значением за февраль–сентябрь соответствует 75 % вкладу в тренд увеличения температуры поздней осенью и в начале зимы.

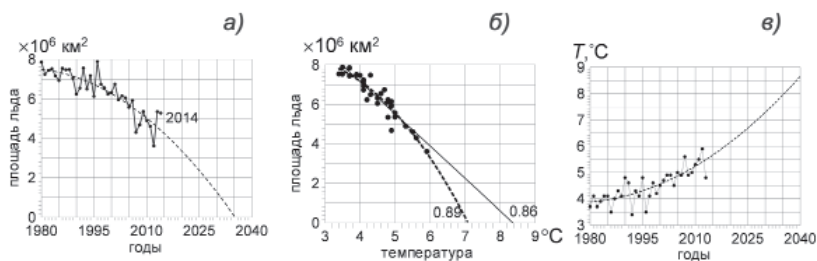


Рис. 5. Оценки эволюции площади льда в сентябре на основе ее связи с летней температурой воздуха и путем экстраполяции наблюдаемого ее сокращения.

a — экстраполяция площади льда полином 2-й степени (коэф. детерминации 0,78) в сентябре до ее исчезновения около 2035 г.; *б* — линейная (к-т детерминации 0,85) и квадратичная (коэф. 0,89) экстраполяция зависимостей между летней температурой и площадью льда в сентябре, показывающая температуру, при превышении которой лед может исчезнуть (около 8,5 и 7 °С); *в* — квадратичная экстраполяция (коэф. детерминации 0,65) летней температуры воздуха, указывающая на увеличение температуры до значений 7 и 8,5 °С к концу 2020-х и 2030-х гг. соответственно.

Тесная связь между повышением температуры воздуха летом и сокращением площади льда в сентябре позволяет выполнить экстраполяцию эволюции площади льда в сентябре, используя статистическую модель этой зависимости. Наряду с этим приемом можно экстраполировать и наблюдаемую площадь льда в сентябре, что повышает достоверность экстраполяции при совпадении результатов обоих методов. Рис. 5 показывает результаты применения обоих методов экстраполяции и подтверждает их идентичность в указании на возможное исчезновение льда в сентябре к середине 2030-х годов. Это укладывается в диапазон оценок сроков исчезновения льда в расчетах по глобальным моделям климата (Павлова, Катцов, 2013; Overland, Wang, 2013).

ОЦЕНКА РОЛИ МЕРИДИОНАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА В АТМОСФЕРЕ В УСИЛЕНИИ ПОТЕПЛЕНИЯ В АРКТИКЕ

Влияние меридиональной составляющей переносов тепла на формирование климата и его изменений рассматривалось многими исследователями (см. обзор в ст. (Алексеев, 2014а)). В работах (Алексеев, Подгорный, 1991; Алексеев и др., 1990) была показана возможность использования величины температурного контраста между низкими и высокими широтами в качестве индикатора меридионального переноса в атмосфере и предложен индекс, характеризующий неоднородность распределения ПТВ вдоль меридиана от экватора до полюса:

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

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

В табл. 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. Эта обратная связь усиливается весной и осенью, что может объясняться ослаблением влияния зонального контраста температуры между сушей и океаном в эти сезоны.

Таблица 1

Корреляция между индексом D_M и средней температурой в области $67,5^\circ$ – $87,5^\circ$ с.ш. по данным NCEP за 1948–2010. Макс R^2 — эффективность максимальной корреляции

Сезон	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Макс 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	-0,90	-0,34	-0,62	0,81
Лето	-0,65	-0,37	-0,50	-0,67	-0,61	0,45
Осень	-0,82	-0,55	-0,54	-0,22	-0,86	0,74

Высокие значения коэффициентов корреляции сохраняются и в случаях сопоставления значений D_M со средней температурой воздуха на всем Северном полушарии и на Земле в целом (см. рис. 6). Это можно рассматривать как подтверждение гипотезы динамического усиления глобальных изменений температуры воздуха.

В пространственном распределении коэффициента корреляции между средними за зиму D_M и температурой на Северном полушарии, заданной в узлах регулярной сетки (см. рис. 7 на цв. вклейке) выделяется оппозиция между потеплением в Арктике и умеренных широтах с максимумом над Евразией и похолоданием в субтропическом поясе с экстремумом над Северной Африкой. Также заметно понижение температуры в области Эль-Ниньо, в районе Северо-Западной Атлантики и прилегающей к ней части Северной Америки.

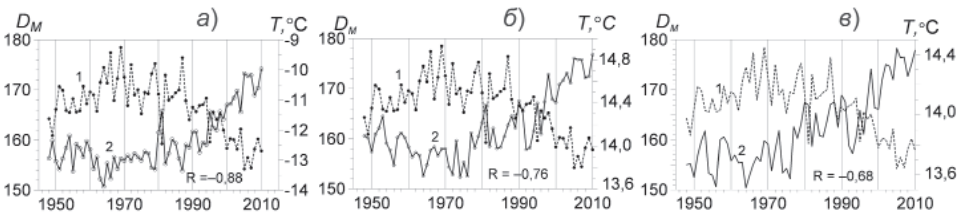


Рис. 6. Изменения индекса D_M (1) и средней годовой температуры воздуха (2) в высоких широтах ($67,5$ – $87,5^\circ$ с.ш., а), в Северном полушарии (б) и на Земле в целом (в), рассчитанные по данным NCEP. R — коэффициент корреляции.

Используя связь между индексом меридионального переноса и средней температурой разных областей, оценим вклад переноса в потепление этих областей после 1969 г. 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 межширотного 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 величину тренда средней температуры могут быть получены в соответствии с формулами

$$T_M = \beta_{DT} D_M, \quad T_M = \beta_{DT} (\alpha_M t + D'_M), \quad \alpha_{MT} = \beta_{DT} \alpha_M, \quad \alpha_T = \alpha_{MT} + \alpha_{RT},$$

где T_M — часть изменений температуры, определяемая переносом, β_{DT} — коэф. регрессии, α_M — коэф. тренда D_M , α_{MT} — тренд температуры, связанный с D_M , α_{RT} — с другими причинами. Вклад переноса в тренд температуры определен как $C_M = \alpha_{MT} / \alpha_T \cdot 100$ %. Результаты расчета C_M представлены на рис. 8.

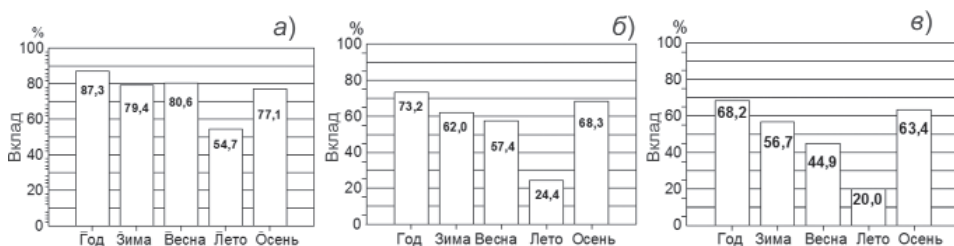


Рис. 8. Вклад (%) усиления меридионального переноса в тренд средней температуры воздуха в 1969–2008 г. в высоких широтах (67,5°–87,5°с.ш., а), на Северном полушарии (б), на Земле в целом (в), рассчитанный по данным реанализа NCEP.

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.

ВЫВОДЫ

Изменения приповерхностной температуры воздуха над областью морской Арктики, включающей покрытую льдами в зимний период акваторию Северного Ледовитого океана, характеризуются повышением зимних температур после 1998 г. и ростом летних температур после 1996 г. с абсолютным максимумом в 2012 г.

В последние 15 лет происходило ускоренное сокращение площади арктического морского ледяного покрова в конце летнего периода, завершившееся самым глубоким ее минимумом в сентябре 2012 г.

В значениях летней приповерхностной температуры воздуха в морской Арктике интегрируется влияние разных факторов на сокращение площади льда. Изменения температуры и изменения площади льда в сентябре согласованы с коэффициентом корреляции 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 1980–2014 гг. Обе модели указывают на период 2030–2040 гг., когда может произойти исчезновение льда в конце летнего сезона при сохранении наблюдаемых темпов потепления.

На изменения площади арктического морского льда зимой также влияют приток теплой и соленой атлантической воды и смещения границы ее распространения в приатлантической Арктике, особенно заметные в Баренцевом море. Это объясняется тем, что теплая атлантическая вода поступает в южную часть моря и зимой препятствует распространению льда к югу.

Рост меридионального переноса в атмосфере вносит основной вклад в тренд средней температуры в Арктике за 1969–2008 гг., 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.

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). Данные реанализа NCEP обеспечены NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA (URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>). Данные о площади, занятой морским льдом на Северном полушарии, обеспечены NSIDC (URL: <http://www.nsidc.colorado.edu>). Данные о температуре воды на разрезе по Кольскому меридиану обеспечены ПИНРО (URL: <http://www.pinro.ru/n22/index/phpstructure/labs/labhidro/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров Е.И., Дементьев А.А.* База приземных метеорологических данных полярных районов и ее использование // Формирование базы данных по морским льдам и гидрометеорологии. СПб.: Гидрометеоиздат, 1995. С. 67–75.
- Алексеев Г. В., Данилов А. И., Смоляницкий В. М.* Летнее сокращение морских льдов в Арктике в 2012 г. // Российские полярные исследования. 2012. № 3 (9). С. 11–13.
- Алексеев Г.В.* Динамическое усиление глобального потепления // Труды международной конференции памяти академика А.М. Обухова. М.: ГЕОС, 2014а. С. 290–306.
- Алексеев Г.В.* Арктическое измерение глобального потепления // Лед и снег. 2014б. № 2. С. 53–68.
- 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. Серия ФАО. 2009. Т. 45. № 6. С. 723–735.
- Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Смоляницкий В.М., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В.* Эволюция площади морского ледяного покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2 (в печати).
- Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Харланенкова Н.Е.* Климатические изменения в морской Арктике в начале XXI века // Метеорологические и геофизические исследования. М.: Европейские издания, 2011. С. 3–25.

Алексеев Г.В., Подгорный И.А. Роль адвекции и других факторов в формировании полярного климата // Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б.А. Круских. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. С. 4–18.

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

Ван Мигем Ж. Энергетика атмосферы / Под ред. Л.Т. Матвеева. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 327 с.

Визе В.Ю. Причина потепления Арктики // Советская Арктика. 1937. № 1. С. 1–7.

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

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

Захаров В.Ф. Внутривековые изменения в распространении морских арктических льдов в XX столетии // Формирование и динамика современного климата Арктики / Под ред. Г.В. Алексеева. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 112–159.

Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Ретина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65.

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

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

Павлова Т.В., Катцов В.М. 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. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 135 с.

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

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

Comiso J. C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35. L01703, doi:10.1029/2007GL031972.

Enfield D. B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. // Geophys. Res. Lett. 2001. № 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. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea ice variability // Tellus. 2004. Vol. 56A. P. 328–341.

Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // Geophys. Res. Lett. 2009. Vol. 36. L15501, doi:10.1029/2009GL039035.

Miles M. W., Divine D.V., Furevik T., Jansen E., Moros M., Ogilvie A.E.J. A signal of persistent Atlantic multidecadal variability in Arctic sea ice // Geophys. Res. Lett. 2014. Vol. 41. Doi:10.1002/2013GL058084.

Nakamura N., Oort A.H. Atmospheric heat budgets of the polar regions // Journ. Geophys. Res. 1988. Vol. 93(D8). P. 9510–9524.

Overland J. E., Wang M. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? // Geophys. Res. Lett. 2013. Vol. 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. The large-scale energy budget of the Arctic // Journ. Geophys. Res. 2007. № 112. D11122. Doi:10.1029/2006JD008230.

Stroeve J.C., Maslanik J., Serreze M.C., Rigor I., Meier W., Fowler C. Sea ice response to an extreme negative phase of the Arctic Oscillation during winter 2009/2010 // *Geophys. Res. Lett.* 2011. № 38. L02502. Doi:10.1029/2010GL045662.

Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. L09501. Doi:10.1029/2007GL029703.

G.V.ALEKSEEV, V.F.RADIONOV, E.I. ALEKSANDROV, N.E. IVANOV, N.E. KHARLANENKOVA

ARCTIC CLIMATE CHANGE UNDER GLOBAL WARMING

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 their Arctic amplification. It is shown that increase of surface air temperature began in the 1990s and reached its peak in 2012. Rapid reduction of the Arctic sea ice cover at the end of the summer occurred concurrently and reached the deepest minimum in September 2012. The inflow of warm and salty Atlantic water and displacement limits of its distribution in the sub Atlantic Arctic impacts on changes of sea ice extent in winter, especially noticeable in the Barents Sea. It is proposed that the greatest contribution to amplified warming of the Arctic climate belong the poleward atmospheric transport of heat.

Keywords: Arctic, global warming, arctic amplification.

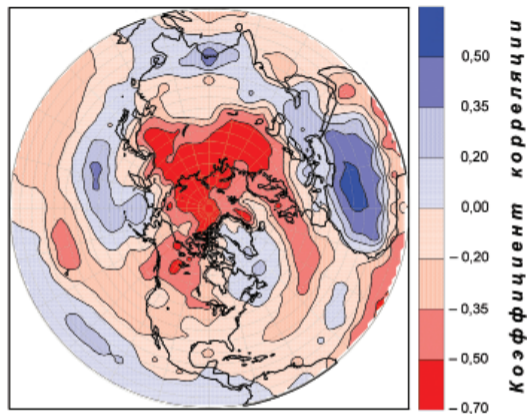


Рис. 7. Корреляция между зимними значениями индекса меридионального переноса DM и температуры воздуха зимой в Северном полушарии, рассчитанная по данным NCEP за 1948–2010 гг. Отрицательным значениям соответствует повышение температуры (выделено красным цветом).