

## ВЛИЯНИЕ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ В НИЗКИХ ШИРОТАХ ОКЕАНА НА КОЛЕБАНИЯ КЛИМАТА АРКТИКИ И ИХ ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ

Г. В. Алексеев, А. Е. Вязилова, Н. И. Глок, Н. Е. Иванов, Н. Е. Харланенкова  
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт  
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2019 г.

*Глобальное потепление в Арктике усиливается под влиянием роста атмосферного и океанского переносов тепла и влаги из низких широт, увеличения притока длинноволновой радиации к поверхности вследствие роста притока водяного пара зимой и усиления таяния и увеличения пространств открытой воды летом. Совместное влияние атмосферных и океанических притоков тепла из низких широт океана на приатлантическую Арктику формирует предсказуемую часть межгодовой изменчивости температуры воздуха и морского ледяного покрова. Регрессионная модель прогноза этой части может обеспечить эффективный прогноз летней площади льда с заблаговременностью до нескольких десятилетий.*

**Ключевые слова:** Арктика, климат, арктическое усиление, переносы из низких широт, морской лед, предсказуемость.

### Введение

Изменения климата Арктики составляют одно из актуальных и дискуссионных направлений современных климатических исследований. Потепление, происходящее с конца XX в. и усилившееся здесь в начале нынешнего столетия, привлекает особое внимание, а сокращение площади морского льда стало наиболее обсуждаемым его проявлением. Поэтому оценка происходящих изменений в состоянии морских льдов, их связи с другими процессами в арктической климатической системе и с глобальными изменениями климата является весьма актуальной.

Основной причиной глобального потепления считается рост концентрации парниковых газов в атмосфере в результате деятельности человека [1]. В Арктике глобальное потепление развивается с участием роста переноса тепла и влаги из низких широт, который, в свою очередь, приводит в действие обратные связи в арктической климатической системе — рост поглощения тепла от Солнца в результате увеличения пространств открытой воды, увеличение притока длинноволновой радиации к поверхности вследствие роста концентрации водяного пара в атмосфере.

Увеличение меридионального атмосферного и океанического притока тепла в Арктику среди причин арктического усиления глобального потепления рассматривалось во многих работах [2—5]. Рост меридиональных атмосферных переносов тепла в Арктику связан с изменениями циркуляции атмосферы, в частности в результате внешних воздействий на интенсивность и пространственно-временное распределение атмосферных циркуляционных структур. Непосредственное воздействие на атмосферную циркуляцию и, следовательно, на меридиональный атмосферный перенос тепла оказывают аномалии температуры поверхности океана (ТПО) [5—12]. Здесь и далее под аномалиями ТПО понимаются аномалии среднемесячной ТПО относительно многолетних средних значений.

Особенно велика роль аномалий температуры поверхности океана в низких широтах, поскольку здесь запасается основная часть притока тепла сверху от солнечной радиации и антропогенного форсинга [1; 13; 14]. Над областями аномального повышения температуры воды усиливается конвекция в тропической атмосфере, сопровождающаяся интенсификацией и расширением циркуляционной ячейки Хедли [16—17].

Среди механизмов передачи влияния аномалий ТПО в низких широтах океана в Арктику наиболее часто указывают на усиление волн Россби и измене-

ния режима осцилляции Маддена — Джулиана в атмосфере [18—21]. Аномалии ТПО в тропиках воздействуют и на Северо-Атлантическое колебание [9; 10; 13]. В модельных экспериментах [22] найдена связь между аномалиями нагревания в тропической области Северной Атлантики и зимним Северо-Атлантическим колебанием, которая осуществляется через меридиональную циркуляцию над Атлантическим океаном. Перечисленные исследования воспроизводят реакцию атмосферной циркуляции на аномалию ТПО и ее проявления в Арктике спустя одну-две недели. В то же время остается открытым вопрос о влиянии аномалий ТПО в низких широтах на климатические изменения, включающие тренды и межгодовые колебания.

Анализ причин климатических изменений арктического морского ледяного покрова в приатлантической Арктике привел исследователей к выводу о влиянии притока воды из Северной Атлантики на распространение здесь морского льда в период его формирования [23—25]. В. Ю. Визе [23], изучавший первое потепление Арктики в период его развития, назвал причинами потепления усиление атмосферной циркуляции и увеличение притока атлантической воды. В. Ф. Захаров [24; 26] указал на тесную связь между притоком воды из Атлантики и распространением морского льда в конце зимы в Гренландском и Баренцевом морях. В экспериментах с глобальной моделью климата [2] подтверждено, что увеличение поступления атлантической воды в Баренцево море оказывает сильное влияние на площадь морского льда в результате сокращения области ледообразования и что океан влияет на изменения массы льда сильнее атмосферы — как на среднее значение, так и на изменчивость.

Цель данной работы — показать роль атмосферного и океанского переносов тепла и влаги из низких широт в развитии потепления Арктики и влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на формировании переносов, а также продемонстрировать возможность использования установленных зависимостей для климатического прогнозирования в Арктике, в частности состояния морских льдов.

### Влияние переносов в атмосфере и океане на климат Арктики

Выполненные нами расчеты атмосферных переносов тепла и влаги на различных изобарических поверхностях по данным реанализа ERA/Interim за 1979—2015 гг. показали, что основной меридио-

нальный атмосферный приток явного и скрытого тепла в высокоширотную Арктику поступает в зимний период через атлантическую часть (от 0° в. д. до 80° в. д.) ее границы по 70° с. ш. в слое от поверхности до 750 гПа. Вклад увеличения этого притока в повышение средней температуры воздуха зимой на поверхности области 70—90° с. ш. за 1979—2015 гг. составил более 40%, а в межгодовую изменчивость — более 50% [27].

На потепление в Арктике и на сокращение площади морских льдов влияет также поступление теплой и соленой воды из Северной Атлантики в Баренцево и Гренландское моря. Межгодовые изменения в океанском притоке тепла из Северной Атлантики отражаются в колебаниях температуры воды на разрезе по Кольскому меридиану в Баренцевом море [28], которые подтверждают сильное влияние притока атлантической воды на морской ледяной покров в приатлантической Арктике в холодную часть года. Тесная связь между температурой воды, поступающей из Северной Атлантики в Баренцево море, и площадью льда в течение всего периода нарастания льда с декабря до начала таяния в июне (табл. 1) подтверждена в [25].

Таким образом, атмосферный и океанский переносы тепла из прилегающих областей Северной Атлантики составляют важный источник развития потепления и межгодовой изменчивости климата Арктики. Дальнейшие исследования показали, что аномалии ТПО в низких широтах Атлантического, Индийского и Тихого океанов (рис. 1) оказывают влияние на переносы, которое проявляется спустя два-три года в переносах тепла, в температуре воды, воздуха и площади льда в Северном Ледовитом океане (СЛО) [4; 29].

Механизм влияния аномалий температуры поверхности океана включает взаимодействие циркуляции океана и атмосферы. Аномалии ТПО в низких широтах, достигающие максимума в сентябре-октябре, усиливают меридиональную составляющую атмосферной циркуляции, ослабляют Северо-Атлантическое колебание в атмосфере, что способствует уменьшению потерь тепла океаном (рис. 2).

Вместе с увеличением океанского переноса тепла в системе Гольфстрим, Северо-Атлантическое, Западно-Шпицбергенское и Норвежское течения это усиливает океанический приток тепла в Норвежское и Баренцево моря и атмосферные переносы тепла и влаги в Арктику и приводит к потеплению Арктики в холодную половину года примерно через 2,25 года.

**Таблица 1. Корреляция между температурой воды в слое 50—200 м на Кольском разрезе и площадью льда в Баренцевом море в 1979—2014 гг.**

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Коэффициент корреляции	<b>-0,83</b>	<b>-0,82</b>	<b>-0,70</b>	<b>-0,78</b>	<b>-0,87</b>	<b>-0,83</b>	-0,67	-0,48	-0,26	-0,28	-0,44	-0,70

**Примечание.** Полу жирным шрифтом выделены коэффициенты 0,79 и более (по модулю).

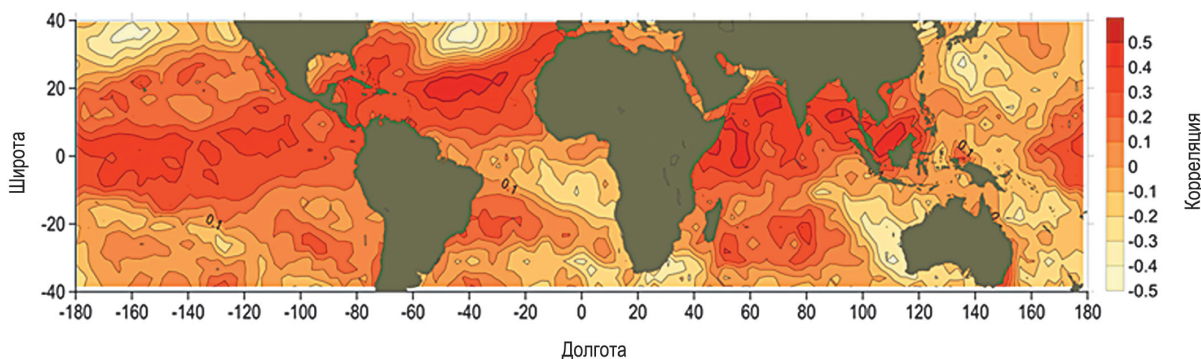


Рис. 1. Области в низких широтах Тихого, Атлантического и Индийского океанов, октябрьские аномалии ТПО в которых коррелированы с зимними переносами тепла в Арктику спустя 27 месяцев [4]. Цветом показаны значения коэффициентов корреляции между ТПО в октябре и переносами явного тепла на 1000 гПа в декабре-феврале через 70° с. ш. в секторе 0–80° в. д. (атлантические «ворота» в Арктику)

Fig. 1. Areas in the low latitudes of the Pacific, Atlantic and Indian oceans, where October SST anomalies are correlated with winter heat transfer to the Arctic after 27 months [4]. The color shows the values of the correlation coefficients between SST in October and the sensible heat transfer per 1000 hPa in December – February through 70° N in the 0–80° E sector (Atlantic “gate” to the Arctic)

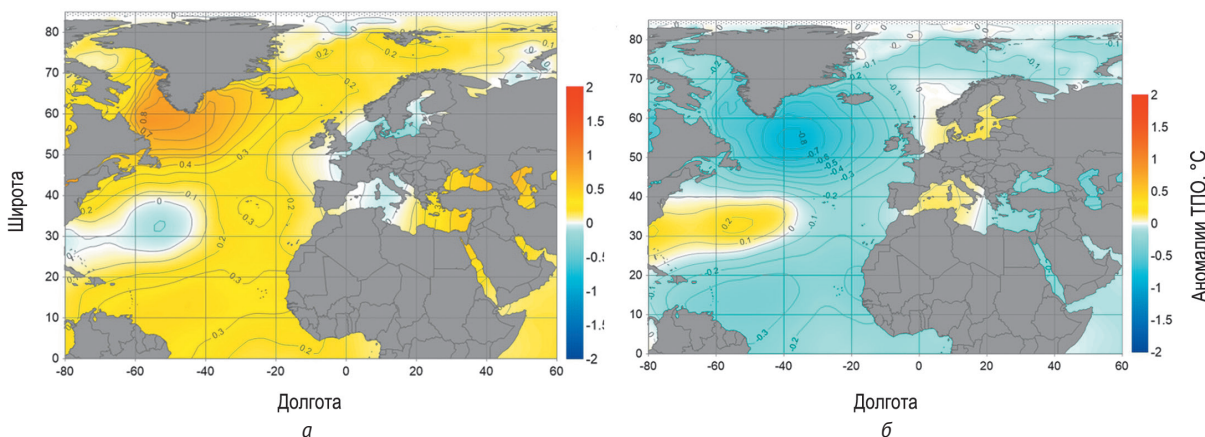


Рис. 2. Аномалии ТПО в Северной Атлантике при аномальных состояниях Северо-Атлантического колебания. Показаны композиты аномалий среднегодовой ТПО при аномальных (более  $\sigma$ ) среднегодовых значениях индекса Северо-Атлантического колебания (САК) в 1950–2015 гг.: а – при отрицательных индексах САК, б – при положительных индексах САК [4]

Fig. 2. SST anomalies in the North Atlantic during abnormal conditions of the North Atlantic Oscillation. Composites of anomalies of mean annual SST are shown at anomalous (more than  $\sigma$ ) mean annual values of the North Atlantic Oscillation Index (NAO) in 1950–2015: а – with negative NAO Indices, б – with positive NAO Indices [4]

Летом усиление потепления в Арктике значительно меньше зимнего. Основной вклад вносят радиационные притоки тепла к поверхности льда, в частности, нисходящая длинноволновая радиация, которая увеличивается вследствие роста содержания водяного пара в атмосфере. В то же время атмосферный перенос тепла и влаги в Арктику через 70° с. ш. не влияет на температуру воздуха и содержание водяного пара в нижней тропосфере, где преобладает вынос водяного пара из Арктики [5] (рис. 3).

Роль переносов тепла и влаги в атмосфере и океане, радиационных переносов и обратных связей в формировании и усилении потепления в Арктике можно представить в виде схемы (рис. 4).

Приток тепла от Солнца включает солнечную инсоляцию и ее межгодовые изменения под влиянием прецессии, нутации, изменений расстояния между Землей и Солнцем, солнечной активности. Аномалии

инсоляции от этих изменений малы, но их эффект может усиливаться обратными связями в низких широтах, например между температурой, содержанием водяного пара и нисходящей длинноволновой радиацией. Приток тепла от Солнца необходим и для формирования повышения ТПО под влиянием роста содержания  $\text{CO}_2$ , реакции на аэрозоли и др. Поэтому в данной общей схеме подразумеваются все возможные внешние факторы появления аномалий ТПО в низких широтах, так или иначе связанные с инсоляцией.

### Влияние на предсказуемость состояния морских льдов в Арктике

Одну из наиболее сложных задач в исследованиях климата представляет прогнозирование его изменений. Особенно это относится к изменениям климата и морского льда в Арктике [30], на которые прихо-

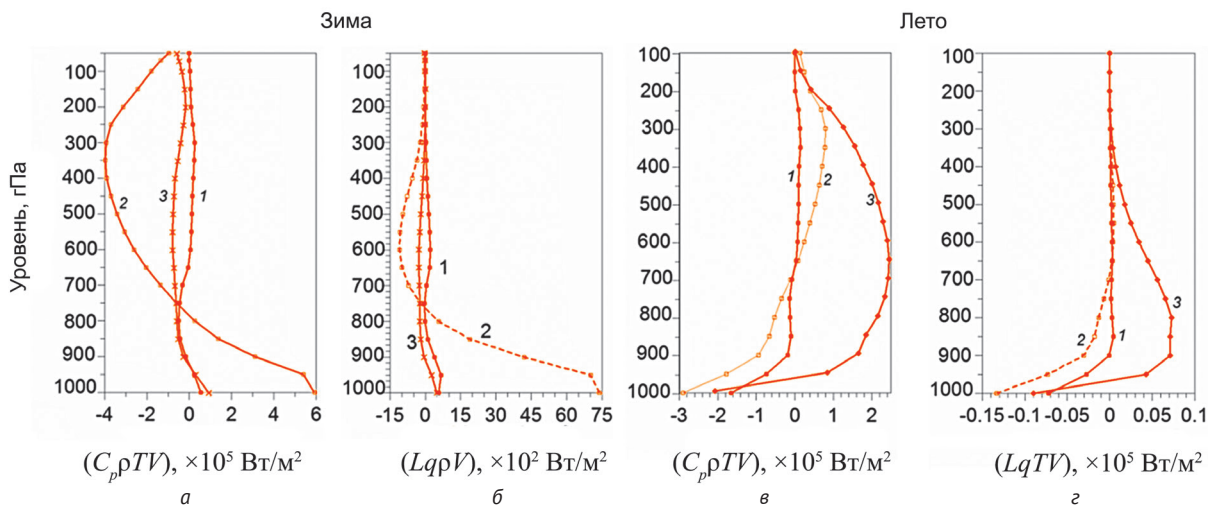


Рис. 3. Вертикальные профили средних меридиональных переносов явного (а, в) и скрытого (б, г) тепла через 70° с. ш. зимой (а, б) и летом (в, г): 1 – средний перенос через весь круг широты, 2 – через атлантическую часть (0–80° в. д.), 3 – через тихоокеанскую часть (200–230° в. д.)

Fig. 3. Vertical profiles of the mean meridional transfer of sensible (a, в) and latent (б, г) heat through 70° N in winter (a, б) and in summer (в, г): 1 – mean transfer through the whole range of latitude, 2 – across the Atlantic part (0–80° E), 3 – across the Pacific part (200–230° E)

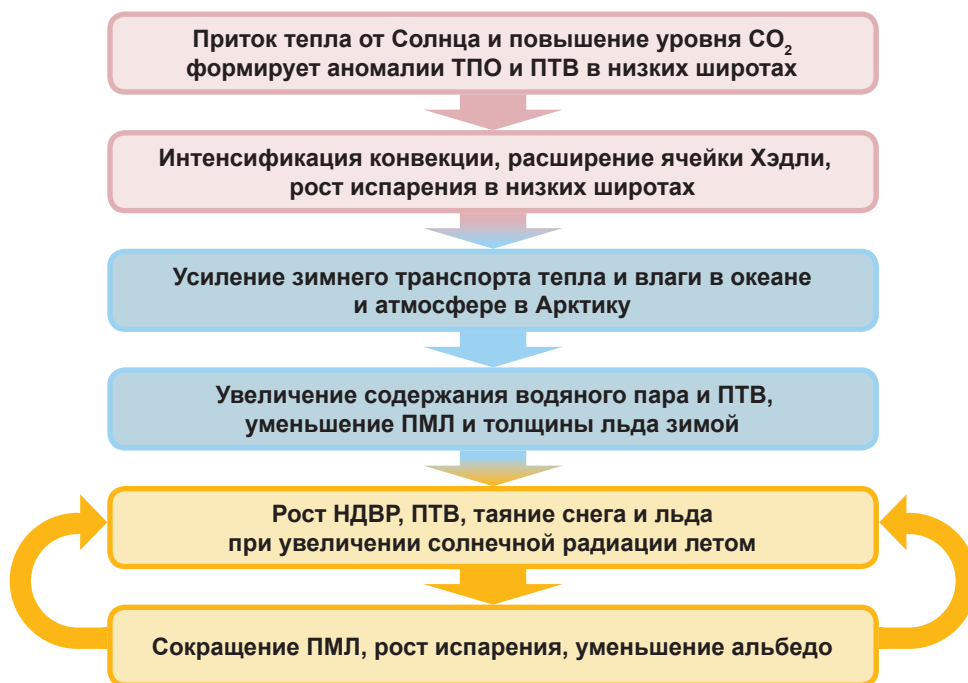


Рис. 4. Схема развития и усиления потепления в Арктике: ПТВ – приповерхностная температура воздуха, ПМЛ – площадь морского льда, НДСВР – нисходящая длинноволновая радиация

Fig. 4. Scheme of warming development in the Arctic: ПТВ – near-surface air temperature, ПМЛ – sea ice area, НДСВР – downward long-wave radiation

дятся наибольшие расхождения между результатами моделирования и наблюдений [31].

Предсказуемость состояния морского льда в Арктике рассматривалась во многих работах. R. Msadek и др. [32] нашли, что прогноз сентябрьского морского льда в Арктике возможен до 7 месяцев вперед. При этом начальные условия играют ключевую роль, и предсказуемость зависит также от состояния

ледяного покрова. Однако в [33] для ледовитости арктических морей в сентябре найдена предсказуемость всего на 2 месяца вперед. Возможность сезонного прогноза площади морского льда обеспечивается в основном трендом, а исключение тренда уменьшает предсказуемость до 2–3 месяцев за исключением ноября-декабря, где она сохраняется до 11 месяцев [34].

За последнее десятилетие улучшилось качество воспроизведения современного климата моделями нового поколения за счет увеличения разрешения, улучшения вычислительных методов и параметризации физических процессов, включения дополнительных климатически значимых процессов [1]. Одним из важнейших условий качественного расчета будущих изменений климата является требование, чтобы модели достоверно воспроизводили основные характеристики современного климата. Пока ни одна из моделей не может быть признана в полной мере удовлетворяющей указанному требованию.

В [35] отмечено, что модели недооценивают величину наблюдаемой изменчивости и искажают ее пространственную структуру. Поэтому способность интерпретировать наблюдаемое изменение климата с использованием моделей ограничена. Прогнозы, основанные на использовании глобальных и региональных моделей климата, зависят от заданного априори внешнего воздействия, которое ограничивается сценариями форсинга антропогенного происхождения без учета возможных аномалий в естественных воздействиях. Это обстоятельство побуждает исследователей обратиться к поискам таких аномалий, которые чаще всего обнаруживаются в притоке тепла от Солнца в результате колебаний его светимости и возмущений параметров движения Земли вокруг Солнца. При этом влияние аномалий естественных воздействий проявляется в колебаниях характеристик климата в виде квазипериодических (циклических) составляющих, представляющих предсказуемую составляющую изменчивости климата.

Прогностический потенциал при таком подходе зависит от вклада циклической составляющей в общую изменчивость и метода его реализации, который может быть простой экстраполяцией периодического колебания либо может использовать внутренние связи в климатической системе, и тогда циклическая составляющая послужит предиктором для прогноза других характеристик климата.

В Арктике климат и состояние морского льда претерпевали наряду с приходящим в настоящее время потеплением и сокращением льда почти столь же значительное потепление и сокращение в 1930-е годы, т. е. более 70 лет назад. Этот феномен, известный как первое потепление Арктики, и его современный аналог образуют вместе 60—80-летнее колебание. Такое же колебание выделено в изменчивости ТПО в Северной Атлантике и названо Атлантической междесятилетней осцилляцией (АМО) [8; 36]. Индекс АМО в настоящее время рассчитывается по данным о ТПО начиная с конца XIX столетия и сохраняет 60—80-летнюю цикличность [37]. Воспроизведение АМО в экспериментах на глобальной модели циркуляции океана [38] подтверждает случайность и устойчивость этого феномена динамики Атлантического океана.

Влияние АМО было обнаружено в изменениях глобальной температуры воздуха [36], температуры воздуха на Северном полушарии [39], в Арктике в из-

менениях атмосферной циркуляции [40], температуры воды, поступающей из Атлантики [41], протяженности и толщины морских льдов [42]. 60—80-летнее колебание в изменениях климата в Арктике также полагается проявлением АМО [38]. Ранее подобное колебание в изменениях атмосферной циркуляции в Арктике [40] было названо «низкочастотным колебанием», которое вместе с трендом составляют низкочастотные компоненты (НЧК) в изменчивости характеристик климата. В [43] предпринята попытка использовать низкочастотные компоненты для прогноза характеристик морского льда на десятилетия вперед, экстраполируя имеющиеся данные с 1930-х годов. В [38] 60-летнее колебание включено в атмосферный форсинг глобальной модели циркуляции океана для прогноза изменений климата и морского льда в Арктике до 2060 г.

Влияние на Арктику атмосферных и океанических притоков тепла, берущих начало в низких широтах океана, указало на приатлантическую Арктику как на ключевой регион, в котором прежде всего проявляется это влияние, распространяющееся далее на всю морскую Арктику [25; 29]. Благоприятным для разработки климатического прогноза является и то обстоятельство, что наблюдения за климатом здесь начаты с конца XIX столетия, почти на 50 лет раньше, чем в других арктических областях. При этом наиболее полные и надежные данные имеются о температуре воздуха на метеорологических станциях, расположенных на островах и побережье от западной Гренландии до Новой Земли (рис. 5а).

По этим данным получены среднемесячные, сезонные, полугодовые и годовые средние значения за 1900—2017 гг., которые затем усреднены по всем шести станциям. В восточном регионе морской Арктики имеется лишь одна станция с длительными наблюдениями, расположенная на мысе Барроу. Данные этой станции были добавлены к шести станциям, что несколько повысило репрезентативность среднего по семи станциям по сравнению со средним по шести станциям для характеристики климата всей морской Арктики.

Изменчивость средней температуры воздуха на семи станциях содержит низкочастотные компоненты, состоящее из тренда и периодического (с периодом примерно 70 лет) колебания (рис. 5б и 5в). Вклад НЧК в изменчивость средних за сезон и за год значений температуры воздуха достигает 71% (табл. 2).

Оценки вклада составляющих в таблице получены на основе представления рядов средней температуры  $T_{mg}$  в виде суммы составляющих:

$$T_{mg} = a_m g + B_m \cos\left(\frac{2\pi}{L_m} g + \phi_m\right) + \varepsilon_{mg}, \quad (1)$$

где  $a_m$  — коэффициент тренда;  $B_m$ ,  $L_m$ ,  $\phi_m$  — амплитуда, период, фаза периодического колебания;  $\varepsilon_{mg}$  — шум;  $m$  — индекс осреднения (среднее за сезон, полугодие или год);  $g$  — год от начала ряда ( $g = 1, 2, 3, \dots, N$ ).

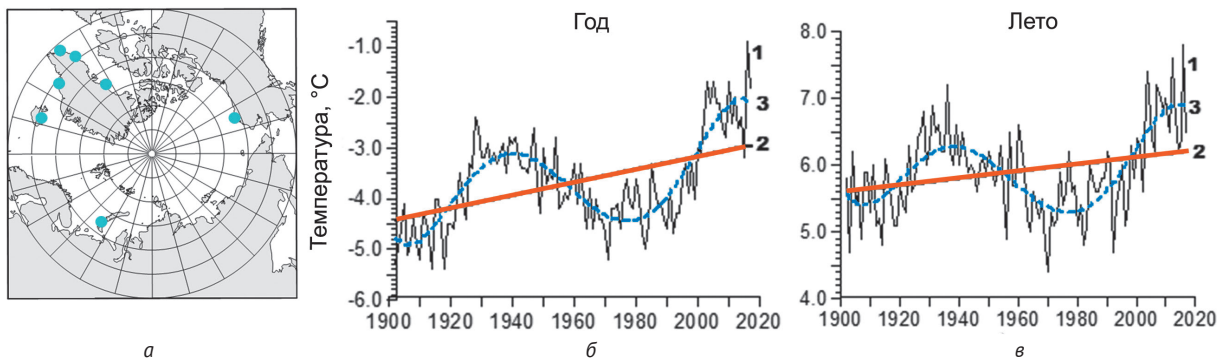


Рис. 5. Температура воздуха на семи арктических станциях с длительными наблюдениями: а – метеорологические станции в морской Арктике с длительными наблюдениями, б – среднегодовая температура, в – летняя температура; 1 – фактические значения, 2 – тренд, 3 – НЧК

Fig. 5. Air temperature at seven Arctic stations with long-term observations: а – meteorological stations in the marine Arctic with long-term observations, б – average annual temperature, в – summer temperature; 1 – actual values, 2 – trend, 3 – low frequency components – LFC

Тренд выделялся методом наименьших квадратов, а его вклад определен как отношение дисперсии тренда, равной  $(a_m N)^2/12$ , к дисперсии ряда  $T_{mg} \times 100\%$ . Вклад НЧК находился как часть дисперсии ряда  $T_{mg}$ , отражаемая ортогональным полиномом пятой степени (заметим, что при увеличении степени полинома коэффициент детерминации практически не менялся). Вклад периодического колебания равен отношению дисперсии периодического колебания  $(B_m)^2/2$ , отнесенной к дисперсии ряда  $T_{mg} \times 100\%$ .

Из табл. 2 следует, что значительная часть межгодовых изменений средней температуры за отдельные сезоны и за год, приходящаяся на тренд и периодическое колебание, составляющие в сумме НЧК, может быть экстраполирована и при значимой связи между температурой и характеристиками морского льда послужить предиктором для прогнозных оценок. В табл. 3 приведены коэффициенты корреляции между средней температурой воздуха на семи арктических станциях и площадью морского льда на акватории Северного Ледовитого океана. Представлены наиболее значительные корреляции,

свидетельствующие о тесной связи межгодовых изменений температуры воздуха на семи станциях и площади морского льда.

Данные в табл. 3 показывают, что площадь, занятая льдом, и площадь льда в СЛО в навигационный период с августа по ноябрь тесно связаны с летней температурой воздуха на семи арктических станциях. Регрессионные модели на основе этой связи могут обеспечить эффективность прогноза при допустимой ошибке  $0,684\sigma$  более 30%. Эта оценка получена в предположении нормальности распределения рассматриваемых характеристик и следующих из этого соотношений.

При коэффициенте корреляции между предиктором и предиктантом  $R$  имеем

$$F(x) = \frac{R^2}{2},$$

где  $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ ;  $R^2$  — часть дисперсии предиктанта, представляемая уравнением регрессии.

Таблица 2. Вклад составляющих межгодовой изменчивости средней за сезон и за год приповерхностной температуры воздуха на семи арктических станциях за 1902—2017 гг.

Составляющая	Вклад, %						
	Зима	Весна	Лето	Осень	ХПГ	ТПГ	Год
НЧК	<b>55</b>	<b>45</b>	<b>51</b>	<b>57</b>	<b>62</b>	<b>59</b>	<b>71</b>
Тренд	25	8	7	18	24	20	22
ПК	30	37	44	39	38	39	49
Шум	45	55	49	43	38	41	29

**Примечания:**

1. НЧК — низкочастотные компоненты, ПК — периодическое колебание (ПК = НЧК – Тренд), Шум = (100 – НЧК).
2. Жирным шрифтом выделен вклад НЧК.

**Таблица 3. Корреляция между летней температурой воздуха на семи арктических станциях и среднемесячной площадью льда в СЛО за 1979—2017 гг.**

Сезон	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Площадь, занятая льдом сплоченностью более 15%												
Июнь	-0,71	-0,73	-0,66	-0,63	-0,70	-0,78	-0,77	-0,78	<b>-0,79</b>	<b>-0,79</b>	-0,76	-0,68
Июль	-0,65	-0,70	-0,65	-0,63	-0,61	-0,68	-0,74	-0,77	<b>-0,80</b>	<b>-0,80</b>	-0,76	-0,73
Лето	-0,64	-0,68	-0,61	-0,60	-0,64	-0,75	-0,78	<b>-0,80</b>	<b>-0,83</b>	<b>-0,84</b>	<b>-0,80</b>	-0,75
Площадь льда												
Июнь	-0,68	-0,69	-0,64	-0,69	-0,78	-0,80	-0,79	-0,76	<b>-0,79</b>	<b>-0,79</b>	-0,73	-0,70
Июль	-0,62	-0,68	-0,64	-0,67	-0,68	-0,72	-0,74	-0,77	<b>-0,81</b>	<b>-0,80</b>	-0,74	-0,71
Лето	-0,60	-0,63	-0,57	-0,65	-0,73	-0,78	<b>-0,80</b>	<b>-0,80</b>	<b>-0,83</b>	<b>-0,83</b>	-0,76	-0,73

**Примечание.** Жирным шрифтом выделены коэффициенты 0,79 и более (по модулю).

По таблицам для  $F(x)$  находим  $x: \left\{ F(x) = \frac{R^2}{2} \right\}$  — границу этой части, к которой добавляем допустимую ошибку прогноза  $\alpha\sigma$  и находим оправдываемость прогнозов по регрессионной модели:

$$P = [2F(x + \alpha\sigma)] \times 100\%.$$

Эффективность прогноза по уравнению регрессии относительно климата

$$E = [2F(x + \alpha\sigma) - 2F(\alpha\sigma)] \times 100\%.$$

Применение регрессионной модели для климатических прогнозных оценок характеристик ледяного покрова требует задания предиктора вперед на необходимую заблаговременность прогноза. Значительный вклад низкочастотного колебания в изменчивость предиктора (табл. 2) позволяет экстраполировать эту часть его межгодовой изменчивости на требуемую заблаговременность прогноза. Экстраполяция осуществляется по формуле (1) путем наложения на тренд периодического колебания, что в сумме представляет НЧК в рядах средних температур на семи станциях за разные сезоны, полугодия и за год.

Кроме НЧК в изменчивости предиктора присутствуют более короткопериодные колебания, представляющие шум, который добавляется к экстраполированным значениям. На основании спектрального анализа шума установлены основные энергонесущие полосы частот, соответствующие периодам 25—30 лет, 6—8 лет, 3—4 года, которые выделены полосовым фильтром Баттерворта и добавлены к экстраполированным НЧК. В результате получены экстраполированные ряды предикторов, которые можно использовать для расчета прогноз-

ных оценок по регрессионной модели. Такой прием использован нами для прогнозной оценки до 2060 г. площади, занятой морским льдом в СЛО, по экстраполированной летней температуре воздуха на семи станциях (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что температура воздуха на семи станциях достигает наибольших значений в 2010—2020 гг. На этот период приходятся и абсолютные максимумы, отмечавшиеся в Арктике летом 2012 г. и зимой 2015/16 гг. После этого ожидается относительное понижение температуры в 2040—2050 гг. при сохранении многолетнего положительного тренда. На 2010—2020 гг. приходится и минимум сентябрьской площади льда с последующим ростом до середины 2040-х годов.

### Выводы

В Арктике глобальное потепление усиливается под влиянием роста атмосферного и океанского переносов тепла и влаги из низких широт, который, в свою очередь, приводит в действие обратные связи в арктической климатической системе — увеличение притока длинноволновой радиации к поверхности вследствие роста концентрации водяного пара в атмосфере и поглощения тепла от Солнца в результате увеличения пространств открытой воды летом.

Приток водяного пара через 70° с. ш. значительно влияет на содержание водяного пара и на температуру воздуха в холодную часть года. Летом атмосферный перенос не влияет на температуру воздуха и на содержание водяного пара в нижней тропосфере, где в среднем преобладает вынос водяного пара из Арктики. Многолетние изменения общего содержания водяного пара в арктической атмосфере показывают рост во все месяцы года с максимальным трендом в августе, в то время как перенос

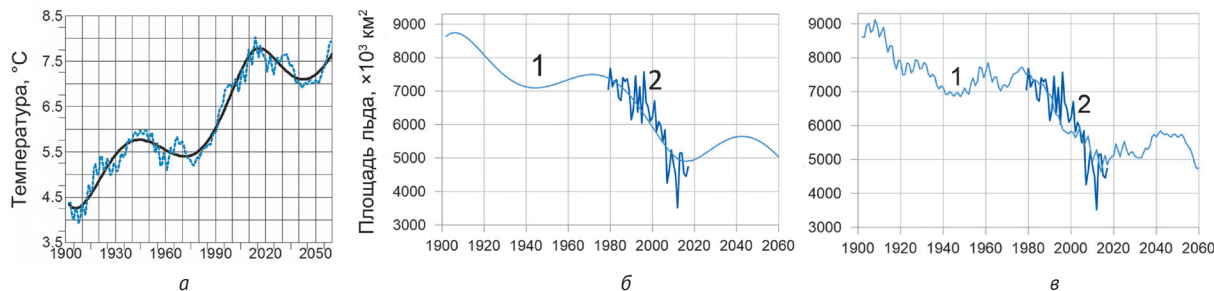


Рис. 6. Прогнозная оценка изменения площади льда в Северном Ледовитом океане до 2060 года: а – экстраполированная летняя температура воздуха (предиктор) с добавлением шума, б – рассчитанная по регрессионной модели площадь льда в Северном Ледовитом океане без добавления шума к предиктору (1) и фактические значения площади льда (2), в – то же, что и б, но с добавлением шума к предиктору

Fig. 6. Predictive values of the change of ice area in the Arctic Ocean until 2060: а – extrapolated summer air temperature (predictor) with added noise, б – the ice area calculated by the regression model in the Arctic Ocean without adding noise to the predictor (1) and the actual values of the ice area (2), в – the same as б, but with the addition of noise to the predictor

водяного пара через 70° с. ш. в летние месяцы не увеличивается.

На потепление в Арктике и особенно на сокращение площади морских льдов влияет поступление теплой и соленой воды из Северной Атлантики в Баренцево и Гренландское моря, объясняющее основную часть изменчивости площади льда в СЛО с декабря по июнь.

Совместное влияние атмосферных и океанических притоков тепла из низких широт океана на приатлантическую Арктику распространяется далее на всю морскую Арктику. Изменчивость средней температуры воздуха над приатлантической Арктикой включает низкочастотные компоненты, состоящие из тренда и периодического (с периодом примерно 70 лет) колебания, вклад которых в изменчивость средней за год температуры воздуха достигает 71%.

НЧК представляют предсказуемую часть изменчивости температуры воздуха, которая тесно связана с характеристиками морского ледяного покрова. Регрессионная модель прогноза на основе этой связи может обеспечить эффективность прогноза летней площади льда при допустимой ошибке  $0,684\sigma$  более 30%, а экстраполяция предиктора (летней температуры на семи станциях) — заблаговременность до нескольких десятилетий.

Статья подготовлена по результатам работы по грантам РФФИ 18-05-00334 и 18-05-60107.

Авторы благодарят рецензента за конструктивные замечания.

### Литература/References

1. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014, 151 p.
2. Sandø A. B., Gao Y., Langehaug H. R. Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations. *J. Geophys. Res. Oceans*, 2014, vol. 119, no. 3, pp. 2095—2108.

3. Årthun M., Eldevik T. On anomalous ocean heat transport toward the Arctic and associated climate predictability. *J. Climate*, 2016, vol. 29, no. 2, pp. 689—704.

4. Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Глок Н. И. и др. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // *Лед и снег*. — 2017. — Т. 57, № 3. — С. 381—390.

- Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Glok N. I., Vyazilova A. E., Ivanov N. E., Smirnov A. V. Vliyanie Atlantiki na poteplenie i sokrashhenie morskogo ledyanogo pokrova v Arktike. [Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic]. *Led i sneg*, 2017, vol. 57, no. 3, pp. 381—390. (In Russian).

5. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. *Int. J. Climatol.*, 2019, pp. 1—11. Available at: <https://doi.org/10.1002/joc.6040>.

6. Марчук Г. И., Скиба Ю. Н. Численный расчет сопряженной задачи для моделей термического взаимодействия атмосферы с океаном и континентом // *Изв. АН СССР. ФАО*. — 1976. — Т. 12, № 5. — С. 459—469.

- Marchuk G. I., Skiba Yu. N. Chislennyi raschet so-pryazhennoi zadachi dlya modelei termicheskogo vzaimodeistviya atmosfery s okeanom i kontinentom. [Numerical calculation of the conjugate problem for a model of the thermal interaction of the atmosphere with the oceans and continents]. *Izv. AN SSSR. FAO*, 1976, vol. 12, no. 5, pp. 459—469. (In Russian).

7. Николаев Ю. В. Крупномасштабное взаимодействие океана и атмосферы и формирование аномалий погоды. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 51 с.
8. Николаев Ю. В. Крупномасштабное взаимодействие океана и атмосферы и формирование аномалий погоды. [Large-scale ocean-atmosphere interaction and weather anomaly formation]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1981, 51 p. (In Russian).

8. Kushnir Y. Interdecadal Variations in North Atlantic Sea Surface Temperature and associated Atmospheric Conditions. *J. Climate*, 1994, vol. 7, pp. 141—157.



9. Robertson A. W., Mechoso C. R., Kim Y.-J. The influence of Atlantic sea surface temperature anomalies on the North Atlantic Oscillation. *J. Climate*, 2000, vol. 13, no. 1, pp. 122—138.
10. Sutton R. T., Hodson D. L. R. Influence of the ocean on North Atlantic climate variability 1871—1999. *J. Climate*, 2003, vol. 16, no. 20, pp. 3296—3313.
11. Wang C., Lee S. K., Enfield D. B. Climate response to anomalously large and small Atlantic warm pools during the summer. *J. Climate*, 2008, vol. 21, pp. 2437—2450.
12. Семенов В. А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // Докл. РАН. — 2008. — Т. 418, № 1. — С. 106—109.  
 Semenov V. A. Vliyanie okeanicheskogo pritoka v Barentsevo more na izmenchivost' klimata v Arktike. [Influence of ocean flow to the Barents Sea on climate variability in the Arctic]. *Dokl. RAN*, 2008, vol. 418, no. 1, pp. 106—109. (In Russian).
13. Hoerling M. P., Hurrell J. W., Xu T. Tropical origins for recent North Atlantic climate change. *Science*, 2001, vol. 292, pp. 90—92.
14. Palmer M. D., Haines K., Tett S. F. B., Ansell T. J. Isolating the signal of ocean global warming. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, no. L23610, pp. 1—6.
15. Huang J., McElroy M. B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years. *J. Climate*, 2014, vol. 27, no. 7, pp. 2656—2666.
16. Lee S., Gong T., Johnson N., Feldstein S. B., Pollard D. On the possible link between tropical convection and the northern hemisphere arctic surface air temperature change between 1958 and 2001. *J. Climate*, 2011, vol. 24, pp. 4350—4367.
17. Garfinkel C. I., Waugh D. W., Polvani L. M. Recent Hadley cell expansion: The role of internal atmospheric variability in reconciling modeled and observed trends. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, vol. 42, no. 24, pp. 10824—10831.
18. Barrett B. S., Henderson G. R., Werling J. S. The influence of the MJO on the intraseasonal variability of Northern Hemisphere spring snow depth. *J. Climate*, 2015, vol. 28, no. 18, pp. 7250—7262.
19. Goss M., Feldstein S. B., Lee S. Stationary wave interference and its relation to tropical convection and Arctic warming. *J. Climate*, 2016, vol. 29, no. 4, pp. 1369—1389.
20. Yoo C., Lee S., Feldstein S. B. Arctic response to an MJO-like tropical heating in an idealized GCM. *J. Atmospheric Sciences*, 2012, vol. 69, no. 8, pp. 2379—2393.
21. Yoo C., Feldstein S., Lee S. The impact of the Madden-Julian Oscillation trend on the Arctic amplification of surface air temperature during the 1979–2008 boreal winter. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, vol. 38, no. 24, pp. 1—6.
22. Yu B., Lin H. Tropical Atmospheric Forcing of the Wintertime North Atlantic Oscillation. *J. Climate*, 2016, vol. 29, no. 5, pp. 1755—1772.
23. Визе В. Ю. Причины потепления Арктики // Совет. Арктика. — 1937. — Т. 1. — С. 1—7.  
 Vize V. Yu. Prichiny potepleniya Arktiki. [The reasons for Arctic warming-up]. *Sovet. Arktika*, 1937, vol. 1, pp. 1—7. (In Russian).
24. Захаров В. Ф. Мировой океан и ледниковые эпохи плейстоцена. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 64 с.  
 Zakharov V. F. Mirovoi okean i lednikovye epokhi pleistotsena. [World ocean and ice ages of the Pleistocene]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1978, 64 p. (In Russian).
25. Алексеев Г. В., Глок Н. И., Смирнов А. В., Вязилова А. Е. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в Баренцевом море и их предсказуемость // Метеорология и гидрология. — 2016. — Т. 8. — С. 38—56.  
 Alekseev G. V., Glok N. I., Smirnov A. V., Vyazilova A. E. Vliyanie Severnoi Atlantiki na kolebaniya klimata v Barentsevom more i ikh predskazuemost'. [The Influence of the North Atlantic on Climate Variations in the Barents Sea and Their Predictability]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2016, vol. 8, pp. 38—56. (In Russian).
26. Захаров В. Ф. Морские льды в климатической системе. — СПб.: Гидрометеиздат, 1996. — 213 с.  
 Zakharov V. F. Morskie l'dy v klimaticheskoi sisteme. [Sea ice in the climate system]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1996, 213 p. (In Russian).
27. Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Уразгильдеева А. В., Бобылев Л. П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // Фундамент. и прикладная климатология. — 2016. — Т. 1. — С. 43—63.  
 Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Urazgildeeva A. V., Bobylev L. P. Vliyanie atmosferykh perenosov tepla i vlagi na usilenie potepleniya v Arktike v zimnii period. [The effect of atmospheric heat and moisture transfers on warming in the Arctic during the winter period]. *Fundament. i prikladnaya klimatologiya*, 2016, vol. 1, pp. 43—63. (In Russian).
28. Карсаков А. Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900—2008 гг. — Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. — 139 с.  
 Karsakov A. L. Okeanograficheskie issledovaniya na razreze "Kol'skii meridian" v Barentsevom more za period 1900—2008 gg. [Oceanographic Studies at the "Kola Meridian" Section in the Barents Sea for 1900—2008]. Murmansk, PINRO, 2009, 139 p. (In Russian).
29. Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Глок Н. И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику // Фундамент. и прикладная климатология. — 2017. — Т. 1. — С. 106—123.  
 Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Glok N. I. Vliyanie anomalii temperatury okeana v nizkikh shirotakh na atmosferyni perenos tepla v Arktiku. [Influence of temperature anomalies of the ocean surface in low latitudes on the atmospheric heat transport to the Arctic]. *Fun-*

- dament. i prikladnaya klimatologiya, 2017, vol. 1, pp. 106—123. (In Russian).
30. Kattsov V. M. et al. Arctic sea-ice change: a grand challenge of climate science. *J. Glaciology*, 2010, vol. 56, no. 200, pp. 1115—1121.
31. Павлова Т. В., Катцов В. М. Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей CMIP5 // Тр. ГГО. — 2013. — Т. 568. — С. 7—25. Pavlova T. V., Kattsov V. M. Ploshchad' ledyanogo pokrova Mirovogo okeana v raschetakh s pomoshch'yu modelei CMIP5. [The area of the World Ocean ice cover in the calculations using the models CMIP5]. *Tr. GGO*, 2013, no. 568, pp. 7—25. (In Russian).
32. Msadek R., Vecchi G. A., Winton M., Gudgel R. G. Importance of initial conditions in seasonal predictions of Arctic sea ice extent. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, no. 14, pp. 5208—5215.
33. Day J. J., Tietsche S., Hawkins E. Pan-Arctic and regional sea ice predictability: initialization month dependence. *J. Climate*, 2014, vol. 27, no. 12, pp. 4371—4390.
34. Sigmund M., Fyfe J. C., Flato G. M., Kharin V. V., Merryfield W. J. Seasonal forecast skill of Arctic sea ice area in a dynamical forecast system. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, DOI: 10.1002/grl.50129.
35. Kravtsov S. Pronounced differences between observed and CMIP5-simulated multidecadal climate variability in the twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44, pp. 5749—5757.
36. Schlesinger M. E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, 1994, vol. 367 (6465), pp. 723—726.
37. Trenberth K., Zhang R. © National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 10 Jan 2019. "The Climate Data Guide: Atlantic Multi-decadal Oscillation (AMO)". Available at: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atlantic-multi-decadal-oscillation-amo>.
38. Панин Г. Н., Дианский Н. А., Соломонова И. В. и др. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 2 (26). — С. 35—52. — DOI: 10.25283/2223-4594-2017-2-35-52. Panin G. N., Diansky N. A., Solomonova I. V. et al. Ot-senka klimaticheskikh izmenenii v Arktike v XXI stoletii na osnove kombinirovannogo prognosticheskogo stsenariya. [Assessment of climatic changes in the arctic in the 21st century based on the combined forecast]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2017, no. 2 (26), pp. 35—52. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-2-35-52. (In Russian).
39. Semenov V., Latif M., Dommenget D., Keenlyside N., Strehz A., Martin T., Park W. The Impact of North Atlantic–Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature. *J. Climate*, 2010, vol. 23, pp. 5668—5677.
40. Polyakov I., Johnson M. Arctic decadal and interdecadal variability. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, vol. 27(24), pp. 4097—4100.
41. Polyakov I. V., Alekseev G. V., Timokhov L. A., Bhatt U., Colony R. L., Simmons H. L., Walsh D., Walsh J. E., Zakharov V. F. Variability of the intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the last 100 years. *J. Climate*, 2004, vol. 17 (23), pp. 4485—4497.
42. Zhang R. Mechanisms for low-frequency variability of summer Arctic sea ice extent. *PNAS*, 2015, vol 112, pp. 4570—4575.
43. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П. и др. Оценка возможных изменений температуры воздуха и площади распространения льда в арктических морях в XXI веке // Научные исследования в Арктике. — Т. 2: Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. — СПб.: Наука, 2007. — С. 111—116. Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Kovalev E. G., Smolanitsky V. M. Otsenka vozmozhnykh izmenenii temperatury vozdukha i ploshchadi rasprostraneniya l'da v arkticheskikh moryakh v KhKhl veke. Nauchnye issledovaniya v Arktike. T. 2. Klimaticheskie izmeneniya ledyanogo pokrova morej Evrazijskogo shel'fa. [Assessment of possible changes in air temperature and ice area in the Arctic seas in the twenty-first century. Scientific Research in the Arctic. Vol. 2. Climatic changes in the ice cover of the seas of the Eurasian Shelf]. *St. Petersburg, Nauka*, 2007, pp. 111—116. (In Russian).

### Информация об авторах

**Алексеев Генрих Васильевич**, доктор географических наук, заведующий отделом, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), e-mail: alexgv@aari.ru.

**Вязилова Анастасия Евгеньевна**, научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38).

**Глок Наталья Ивановна**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38).

**Иванов Николай Евгеньевич**, научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38).

**Харланенкова Наталья Евгеньевна**, научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38).

### Библиографическое описание данной статьи

Алексеев Г. В., Вязилова А. Е., Глок Н. И. и др. Влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на колебания климата Арктики и их предсказуемость // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 3 (35). — С. 73—83. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-73-83.

---

## THE EFFECT OF WATER TEMPERATURE ANOMALIES AT LOW LATITUDES OF THE OCEAN ON ARCTIC CLIMATE VARIATIONS AND THEIR PREDICTABILITY

Alekseev G. V., Vyazilova A. E., Glok N. I., Ivanov N. E., Kharlanenkova N. E.  
Arctic and Antarctic Research Institute (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on April 16, 2019

### Abstract

Global warming in the Arctic is intensified by an increase in the transfer of heat and moisture in the atmosphere and the ocean from low latitudes, an increase in long-wave radiation to the surface due to an increase in water vapor in winter, increased melting and open water in summer. The influx of water vapor through 70° N significantly affects water vapor content and air temperature in the cold part of the year. Summer is dominated by the influx of water vapor from the Arctic. The inflow of warm and saline water from the North Atlantic to the Barents and Greenland Seas makes up the bulk of variability of ice cover in the Arctic Ocean from December to June. The average temperature of water and air in the Atlantic Arctic includes a low-frequency oscillation (LFO), consisting of a trend and periodic (with a period of about 70 years) fluctuations. LFO is a predictable component of air temperature variability, which is closely related to the characteristics of sea ice cover. A regression model based on this relationship can provide an effective prediction of the summer ice cover in the Arctic for a decade or more.

**Keywords:** *Arctic, climate, arctic boost, transport from low latitudes, sea ice, predictability.*

The article was prepared based on the work results on the RFBR grants 18-05-00334 and 18-05-60107.  
The authors are grateful to the reviewer for the constructive remarks.

### Information about the authors

**Alekseev Genrikh Vasilyevich**, Doctor of Geography, Head of Department, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Beringa Str., St. Petersburg, Russia, 199397), e-mail: alexgv@aari.ru.

**Vyazilova Anastasia Evgenyevna**, Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Beringa Str., St. Petersburg, Russia, 199397).

**Glok Natalia Ivanovna**, PhD of Geography, Senior Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Beringa Str., St. Petersburg, Russia, 199397).

**Ivanov Nikolay Evgenyevich**, Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Beringa Str., St. Petersburg, Russia, 199397).

**Kharlanenkova Natalia Evgenyevna**, Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Beringa Str., St. Petersburg, Russia, 199397).

### Bibliographic description

**Alekseev G. V., Vyazilova A. E., Glok N. I., Ivanov N. E., Kharlanenkova N. E.** The effect of water temperature anomalies at low latitudes of the ocean on Arctic climate variations and their predictability. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 3 (35), pp. 73—83. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-73-83. (In Russian).

© Alekseev G. V., Vyazilova A. E., Glok N. I., Ivanov N. E., Kharlanenkova N. E., 2019