

Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.326(269)

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-412>

Влияние температуры поверхности океана в тропиках на антарктический морской лёд в период глобального потепления

© 2019 г. Г.В. Алексеев*, Н.И. Глок, А.Е. Вязилова, Н.Е. Иванов,
Н.Е. Харланенкова, А.В. Смирнов

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*alexgv@aari.ru

Influence of sea surface temperature in the tropics on the Antarctic sea ice under global warming

G.V. Alekseev, N.I. Glok, A.E. Vyasilova, N.E. Ivanov, N.E. Kharlanenkova, A.V. Smirnov

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*alexgv@aari.ru

Received October 29, 2018 / Revised January 21, 2019 / Accepted 22 March, 2019

Keywords: *Antarctica, Intertropical Convergence Zone (ITCZ), latitude of temperature maximum, resistance, sea ice, Sea-Surface temperature (SST).*

Summary

Sea ice fields in the Antarctic, in contrast to the Arctic ones, did not show a reduction in observed global warming, whereas the global climate models indicate its certain decrease. The purpose of the study is to explain this climatic phenomenon on the basis of the idea of joint dynamics of oceanic structures in the Southern Ocean – the Antarctic polar front and the margin of the maximum distribution of sea ice. We used data from the ERA/Interim and HadISST as well as the database on the sea ice for 1979–2017. Relationship between the SST-anomalies in low latitudes of the Northern hemisphere and positions of the Antarctic polar front and maximum sea-ice extent was investigated. It was found that locations of these structures changed under the influence of the SST anomalies in low latitudes. The results obtained confirm existence of the opposite trends in changes in the sea ice extent in the Arctic and Antarctic under the influence of the SST anomalies in the central North Atlantic Ocean. When positive, the anomalies cause a shift of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and the Hadley circulation to the North, while, on the contrary, the negative anomaly promotes the corresponding shift of the Antarctic polar front, followed by the boundary of sea ice.

Citation: Alekseev G.V., Glok N.I., Vyasilova A.E., Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E., Smirnov A.V. Influence of sea surface temperature in the tropics on the Antarctic sea ice under global warming. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (2): 213–221. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-412>.

Поступила 29 октября 2018 г. / После доработки 21 января 2019 г. / Принята к печати 22 марта 2019 г.

Ключевые слова: *Антарктика, зона внутритропической конвекции, морской лёд, температура поверхности океана, устойчивость, широта температурного максимума.*

При наблюдаемом глобальном потеплении морской ледяной покров в Антарктике не проявлял тенденций к сокращению, в то время как глобальные климатические модели показывают его уменьшение. Цель исследования – объяснить этот климатический феномен на основе идеи о совместной динамике океанических структур Южного океана – Антарктического полярного фронта и границы максимального распространения морского льда, положение которых меняется под влиянием аномалий температуры на поверхности океана в низких широтах.

Введение

Антарктический морской ледяной покров в период максимального развития ограничен с севера Антарктическим циркумполярным течением и Антарктическим полярным фронтом (АПФ) и, следовательно, находится под

влиянием факторов, определяющих его положение и интенсивность. Согласованность между максимальным распространением антарктического морского льда в сентябре и положением переходной зоны в стратификации верхнего 100-метрового слоя показана в работе [1]. Причина – разная стратификация верхнего слоя по

обе стороны от переходной зоны. К югу от неё сильно стратифицированный слой способствует быстрому охлаждению воды до точки замерзания и образованию льда. Севернее стратификация в верхнем слое слаба, что приводит к более глубокому перемешиванию, препятствующему быстрому охлаждению и формированию льда. Ранее на основании анализа климатического положения основных океанических и атмосферных циркуляционных структур Южной полярной области было показано [2], что отклонения от зональной симметрии в пространственном положении Антарктического циркумполярного течения, Антарктического полярного фронта, а также полей атмосферного давления и температуры близки между собой и соответствуют смещению их центра от Южного полюса к Полюсу недоступности в Антарктиде.

Данные наблюдений, кроме общего увеличения площади антарктического морского ледяного покрова в 1979–2014 гг., показывают значительные сезонные [3] и региональные [4] отличия в величине и знаке трендов. Годовой ход и тренды площади морских антарктических льдов по результатам модельных экспериментов за 1850–2005 гг. на 18 глобальных моделях из CMIP5 значительно отличаются от наблюдаемых в последние 30 лет [5]. Большинство моделей воспроизводят слишком малую протяжённость морского льда в феврале, а часть из них показывает меньше 2/3 её сентябрьского максимума. В отличие от данных спутниковых наблюдений, которые указывают на некоторое увеличение протяжённости ледяного покрова, среднее модельное её значение уменьшается каждый месяц в 1979–2005 гг., что свидетельствует, по мнению авторов настоящей статьи, об отсутствии в моделях процессов, ответственных за рост протяжённости ледяного покрова в последние 30 лет.

В исследовании [6] отмечено, что во всех экспериментах с глобальными моделями из CMIP5 наблюдаемое сокращение морского льда в Арктике получается при значительно большем глобальном потеплении по сравнению с наблюдаемым. В Антарктике увеличение площади в моделях получается при значительно меньшем глобальном потеплении, чем в действительности. Таким образом, модели не улавливают асимметрию трендов морского льда

в Арктике и Антарктике. Отсюда авторы статьи заключают, что модели могут получить соответствующие действительности тренды морского льда лишь при некорректно заданных условиях в обоих полярных регионах.

Как в модельных, так и в эмпирических исследованиях причины, влияющие на распространение морского ледяного покрова в Антарктике, связаны либо с атмосферным, либо с океаническим воздействием. Так, авторы статьи [7] считают, что противоположные тенденции моделируемого и наблюдаемого антарктического морского ледяного покрова обусловлены тем, что современные глобальные модели воспроизводят зонально симметричное поле давления в отличие от наблюдаемой асимметрии в поле давления. По данным наблюдений и атмосферных реанализов они установили, что междесятилетние изменения Антарктического ледяного покрова вызваны усилением меридиональных ветров, связанных с зональной асимметрией атмосферной циркуляции.

В работе [8] исследовалась роль различных мод атмосферной циркуляции в изменчивости протяжённости морского льда в Антарктике. Установлено заметное влияние региональных мод, которые представляют собой доминирующий фактор взаимодействия между атмосферными полями и морским льдом в Антарктике. Ранее [9] было показано, что Южная круговая мода (South Annular Mode) – ведущая атмосферная циркуляционная мода в Южном полушарии, влияющая на изменения климата. При этом отмечен её рост в направлении к преобладанию положительной фазы. Авторы работы [10], отмечая пространственную неоднородность в межгодовых изменениях распространения морского льда в Антарктике, также связывают её с влиянием изменений в атмосферной циркуляции, что, по их мнению, должно составить тему для будущих исследований. В тихоокеанском секторе Южного океана причину тренда кромки льда видят [11] в южном колебании атмосферной циркуляции, который накладывается на антропогенный форсинг. Обратное влияние морского ледяного покрова Антарктики на атмосферную циркуляцию установлено в экспериментах на глобальной модели климата Хадлеевского центра [12], в которых увеличение площади антарктическо-

го льда вызывает сдвиг среднеширотного джета Южного полушария в сторону полюса.

Океанское влияние на рост антарктического морского ледяного покрова найдено в эксперименте на глобальной модели климата (Kiel Climate model) [13] в связи с вековым колебанием в Южном океане. Колебание зарождается в Южном океане в результате изменения глубокой конвекции в море Уэдделла и относится к собственной океанской моде. Авторы исследования [14] также видят причину в циркуляции Южного океана, которая реагирует на столетний и более продолжительный антропогенный форсинг. Влияние положительной фазы Атлантической междесятилетней осцилляции на перераспределение морского льда между морем Росса и морями Амундсена, Беллинсгаузена и Уэдделла обнаружено в предположении, что северная тропическая Атлантика важна для проекций будущих климатических изменений в Антарктике и может влиять на глобальную термохалинную циркуляцию и изменения уровня океана [15].

Среди океанических причин разрастания антарктического морского ледяного покрова называется также усиление таяния подводной части антарктического ледяного шельфа, влияние которого подтверждается в эксперименте на совместной модели климата [16]. Причину разрастания морского ледяного покрова при потеплении находят в уменьшении притока соли в верхний слой в результате замедления образования льда, что ведёт к усилению стратификации и ослаблению притока тепла для таяния льда, но способствует формированию льда [17]. Обзор публикаций по данной проблеме показывает отсутствие общепринятого объяснения устойчивости морского ледяного покрова Антарктики в период современного глобального потепления и неспособность глобальных климатических моделей воспроизвести этот климатический феномен. Поиск причин наблюдаемых изменений морского ледяного покрова ведётся либо в океане, либо в особенностях атмосферной циркуляции в Южном полушарии. Наш подход будет включать в себя совместный анализ океанических и атмосферных данных в рамках представления о взаимодействии океанических и атмосферных мод, а также процессов в климатической системе Южного полушария и в низких широтах Северного полушария.

Данные и методы

Исследование основано на данных глобальных реанализов HadISST, ERA/Interim, базе ледовых данных, созданной в ААНИИ (<http://www.aari.ru/datasets>), данных об индексах циркуляции атмосферы и аномалиях температуры поверхности океана (ТПО) в океане, представленных в сети Интернет. Используются расчёты многомерных взаимно-корреляционных функций, Фурье-анализ характеристик положения Антарктического полярного фронта и кромки льдов для оценки их круговых мод и асимметрии. С помощью этих методов в низких широтах Мирового океана выделены области, температура воды в которых влияет на положение АПФ, кромки морских льдов и площадь льдов. Получены количественные оценки связи между рядами ТПО и характеристиками положения АПФ, кромки и площади льдов с учётом запаздывания между ними. Найдены связи характерных структур в атмосферных полях с положением океанических структур в Южном океане.

Результаты исследования

Антарктический полярный фронт. По данным реанализа ERA/Interim о среднемесячной температуре воды на поверхности океана определено положение Антарктического полярного фронта в сентябре 1979–2017 гг. путём расчёта максимального меридионального градиента ТПО на каждой долготе через $0,75^\circ$ широты в полосе $50\text{--}70^\circ$ ю.ш. На рис. 1, а показано положение АПФ, соответствующее максимальной (сентябрь 2014 г.) и минимальной (сентябрь 2017 г.) площади морских льдов. По полученному массиву широт положения АПФ на каждой долготе определены среднее многолетнее положение и максимальные отклонения от него (см. рис. 1, б). Разложение широтного положения АПФ в ряд Фурье показывает основной вклад первой круговой моды, центр которой находится вблизи полюса относительной недоступности материка Антарктиды (см. рис. 1, в). Координаты центра круговых мод АПФ смещены от Южного полюса в сторону Полюса относительной недоступности, что согласуется с выводом [2] о влиянии материка Антарктиды на положение климати-

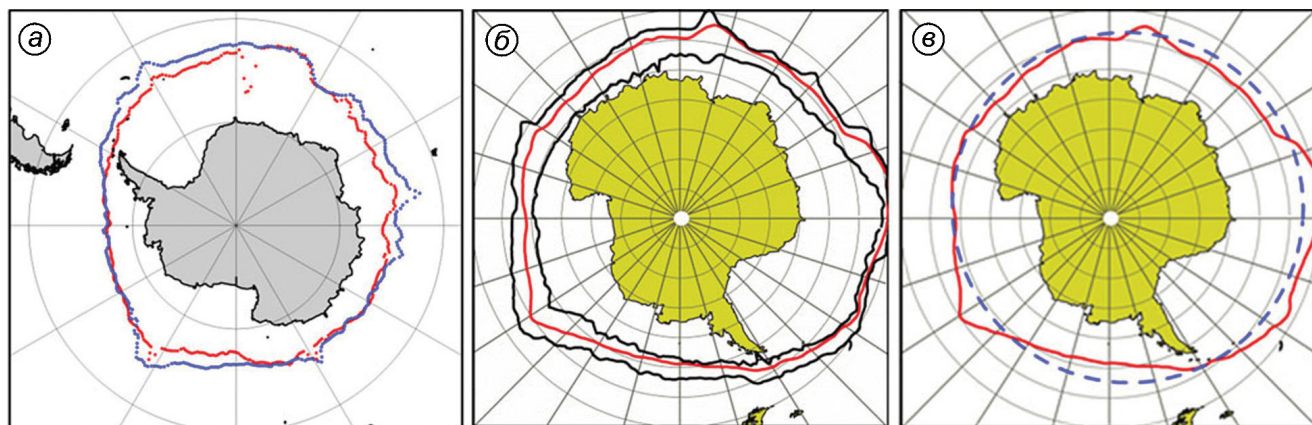


Рис. 1. Положение Антарктического полярного фронта, установленное по данным о среднемесечной температуре поверхности океана в сентябре из ERA/Interim:

a – в 2014 г. (синий) и 2017 г. (красный); *б* – среднее положение и максимальные отклонения от него за 1979–2014 гг.; *в* – круговая мода (пунктир) среднемноголетнего положения Антарктического полярного фронта; координаты центра моды – 86,7° ю.ш., 30° в.д.

Fig. 1. Position of the Antarctic polar front, established according to the monthly sea surface temperature in September from the ERA/Interim:

a – in 2014 (blue) and 2017 (red); *б* – the average position and maximum deviations for 1979–2014; *в* – the circular mode (dotted line) of the average multiyear position of the Antarctic polar front; the coordinates of the mode center are 86,7° S, 30° E

ческих зон в Южном полушарии. На круговую моду приходится 69% в сентябре и 70% в октябре изменчивости положения АПФ в эти месяцы.

Положение Антарктического полярного фронта и площадь морских льдов. Антарктический полярный фронт служит границей распространения поверхностной распреснённой водной

массы на север и соответственно возможного распространения морского льда. Средняя широта АПФ и максимальная площадь льдов в сентябре изменяются год от года согласованно с коэффициентом корреляции $-0,70$ на протяжении 1979–2016 гг. (рис. 2, *a*). Сглаживание аномалий скользящим осреднением по три года усиливает

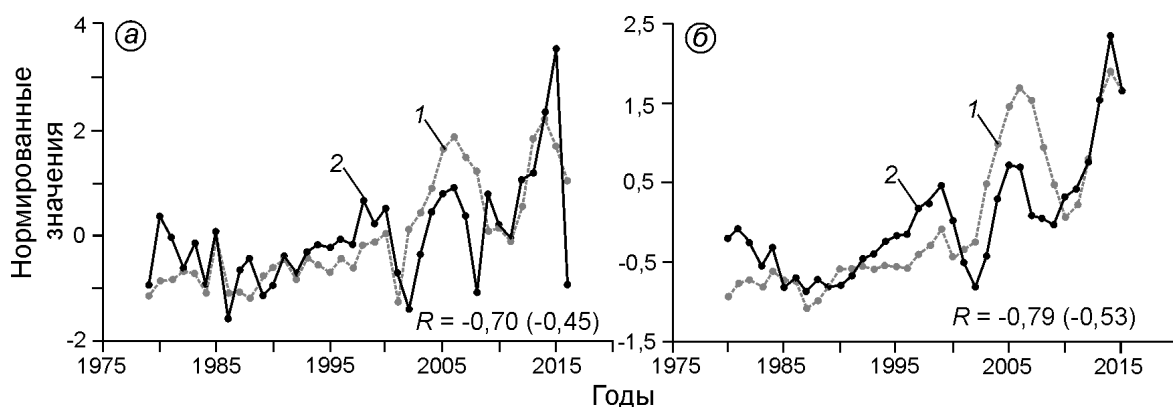


Рис. 2. Нормированные значения аномалий средней широты Антарктического полярного фронта (1) и максимальной площади морского льда (2) в сентябре 1979–2016 гг.:

a – исходные данные; *б* – ряды, сглаженные скользящим осреднением по три года. Аномалии широты для наглядности взяты с обратным знаком. R – коэффициенты корреляции между аномалиями, в скобках – между отклонениями от линейного тренда

Fig. 2. The normalized anomalies of the average latitude of the Antarctic polar front (1) and the maximum of sea ice extent (2) in September 1979–2016.

a – initial data; *б* – smoothed with 3 years window. The anomalies of latitude are taken with the opposite sign. R is the correlation coefficients between the anomalies, in brackets – between deviations from the linear trend

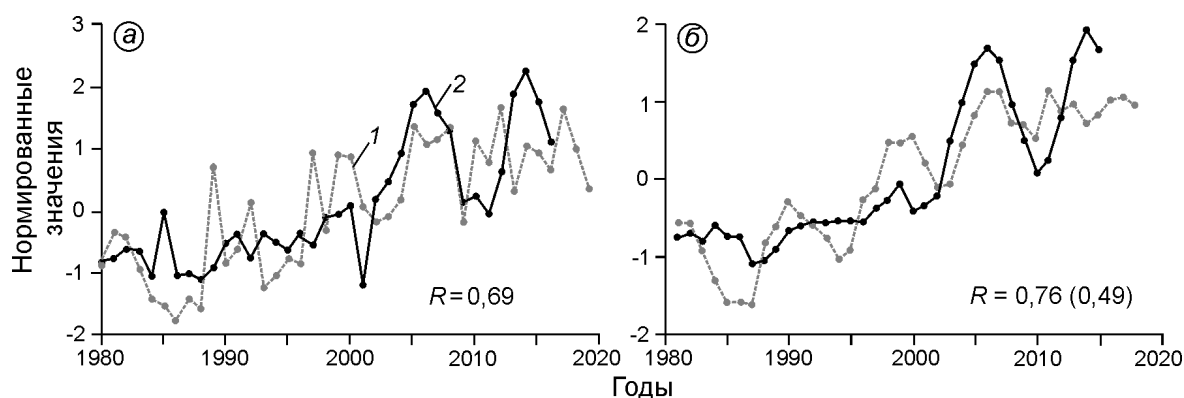


Рис. 3. Нормированные аномалии температуры поверхности океана в области 5–25° с.ш., 60–20° з.д в октябре (1) и широты Антарктического полярного фронта (2) за 1980–2015 гг.:

a – аномалии исходных значений; *б* – то же, после сглаживания скользящим усреднением по три года. Аномалии широты Антарктического полярного фронта запаздывают на два года. R – коэффициент корреляции между (1) и (2)

Fig. 3. Normalized sea surface temperature anomalies in the region of 5–25° N, 60–20° W in October (1) and latitude of Antarctic polar front (2) for 1980–2015:

a – anomalies of the original values; *б* – the same after smoothing with three years window. Anomalies of the Antarctic polar front latitude are delayed by two years. R is the correlation coefficient between (1) and (2)

соответствие между ними (см. рис. 2, б). На распространение льда зимой влияет и температура воздуха. Зависимость между суммой градусодней мороза и максимальной площадью льда за 1979–2017 гг. в сентябре характеризуется коэффициентом корреляции 0,46, а в августе – 0,51. Коэффициент возрастает до 0,50 в сентябре и до 0,53 в августе для минимальной в данном месяце площади льда, что указывает на ослабление ограничивающего влияния АПФ, которое в целом превосходит роль изменений в температуре воздуха при формировании зимнего распространения морского антарктического льда.

Причины изменений в распространении морского льда зимой. Согласованные изменения в положении АПФ и площади льда указывают на постепенное смещение АПФ к северу с максимумом в 2014 г. и рост площади льда от начала наблюдений до 2015 г., после которого АПФ сместился к югу и площади льда резко сократились, достигнув минимума в 2017 г. В этот год отмечен и абсолютный минимум суммы градусодней мороза на акватории, обычно занятой зимой морским льдом. Изменения 2016–2017 гг. очевидно были вызваны мощным Эль-Ниньо в 2015 г. Предыдущие изменения, характеризующиеся постепенным ростом площади морского антарктического льда, ускорившемся после 1997 г., противоположны сокращению морских арктических льдов и поэтому привлекают особое внимание. Ранее

нами была найдена связь сокращения арктических льдов с потеплением в низких широтах Северной Атлантики [18], что навело на поиск подобной связи и для антарктических льдов.

Аномалии температуры поверхности океана в этой же области – 5–25° с.ш. и 60–20° з.д. – были сопоставлены с аномалиями положения АПФ и максимальной площади антарктического льда в сентябре за период 1980–2015 гг. Наибольшее соответствие между ними установлено при запаздывании аномалий АПФ и площади льда относительно аномалии ТПО на два года (рис. 3). Коэффициенты корреляции между аномалиями температуры поверхности океана и широты Антарктического полярного фронта составили 0,69 и 0,76 (после сглаживания), а после удаления тренда – 0,34 и –0,43 соответственно. Связь между аномалиями ТПО и максимальной площадью льда характеризуется коэффициентами корреляции 0,57 для исходных и 0,66 для сглаженных аномалий.

Полученные результаты показали, что противоположные тенденции в изменении площади льда в Арктике и в Антарктике развивались под влиянием аномалий ТПО в одной и той же тропической области Северной Атлантики. Возникает вопрос о механизме подобного воздействия аномалий ТПО. Предположительно он включает смещения таких глобальных климатических структур, как максимум приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и внутритропическая

Тренды нормированных значений максимальной температуры (T_{\max} , К/год) и её средней широты (F , градус/год) на 2 м и на 1000 гПа для 12 месяцев за 1979–2016 гг., $с^{-1}$

	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
T_{1000}	0,011*	0,012	0,015	0,012	0,011	0,011	0,014	0,018	0,017	0,015	0,016	0,015
T_{2m}	0,012	0,014	0,015	0,016	0,015	0,013	0,015	0,018	0,016	0,016	0,014	0,014
F_{1000}	–0,004	0,012	0,007	0,001	0,005	0,004	–0,026	–0,025	–0,017	–0,003	0,017	0,030
F_{2m}	–0,008	0,006	–0,010	–0,007	–0,003	–0,001	–0,036	–0,032	–0,037	–0,039	–0,008	0,003

*Жирным шрифтом отмечены 95%-е значимые тренды.

зона конвекции в атмосфере (ITCZ), вслед за которым смещаются антарктический полярный фронт и кромка максимального распространения льдов в Южном океане.

Максимум ПТВ летом располагается к северу от экватора, а зимой перемещается ближе к экватору, опускаясь на отдельных долготах южнее экватора. Эти сезонные перемещения – следствие наклона оси вращения Земли к плоскости эклиптики. Являются ли эти перемещения регулярными или испытывает многолетние изменения, которые могут иметь последствия в распределении инсоляции на поверхности экваториальной зоны? Для ответа на этот вопрос мы определили положение температурного максимума среднемесячной ПТВ в тропиках от 20° ю.ш. до 20° с.ш. по данным реанализа ERA/Interim с 1979 по 2016 г. Температурный максимум T находился на каждом меридиане l в пределах этой зоны для каждого месяца m каждого года g , фиксировалась его широта F на данном меридиане, а затем обе величины усреднялись по долготе:

$$T_{mg} = (T_{mgl})_l, F_{mg} = (F_{mgl})_l.$$

Использовались поля ПТВ на высоте 2 м и поля температуры на 1000 гПа, значения широты F_{mg} на которых оказались близки (коэффициенты корреляции от 0,88 до 0,61). Наибольшие смещения температурного максимума к экватору отмечены с июля по октябрь, в другие месяцы они незначительны, за исключением ноября и декабря (на 1000 гПа). Максимальная температура во все месяцы растёт и более всего – в августе (таблица). Средняя широта T_{\max} на 2 м в августе–октябре и средняя широта АПФ в сентябре изменяются согласованно – смещение T_{\max} к экватору сопровождается таким же смещением АПФ (рис. 4, а, б) и увеличением максимальной площади морского антарктического льда в сентябре (см. рис. 4, в, г). В этот же пери-

од арктический морской лёд в сентябре сокращался параллельно со смещением T_{\max} в августе–октябре к экватору (рис. 5).

После сглаживания рядов скользящим осреднением по три года коэффициент корреляции возрастает. Корреляция между смещением широты T_{\max} к экватору и площадью льда соответствует противоположным тенденциям в эволюции площади льда в Антарктике и Арктике на протяжении 1979–2016 гг. Это соответствие обеспечивается главным образом их трендами ввиду зашумлённости исходных данных, особенно оценок широты T_{\max} . Разложение годовых серий T_{mg} и F_{mg} в ряд Фурье показало, что амплитуды их сезонных колебаний AT_g и AF_g убывают (рис. 6, а), а расчёт спектра изменчивости ежемесячных значений аномалий широты T_{\max} (по 468 ежемесячным значениям за 1979–2016 гг.) выделил основные масштабы её межгодовых колебаний (см. рис. 6, б). Рост ТПО сопровождается усилением конвекции в атмосфере в зоне внутритропической конвекции (ITCZ) и интенсификацией ячейки Хедли к югу от экватора, что приводит к усилению переноса тёплой воды из Южного полушария, сопровождается смещением к северу АПФ и увеличением площади антарктического морского льда.

Выводы

Определено положение Антарктического полярного фронта в сентябре 1979–2014 гг. На круговую моду АПФ приходится 69% межгодовой изменчивости средней широты в этот месяц. Центр круговой моды АПФ смещён от Южного полюса в сторону Полюса относительной недоступности, что согласуется с выводом [2] о влиянии Антарктического материка на формирование положения климатических зон в Южном

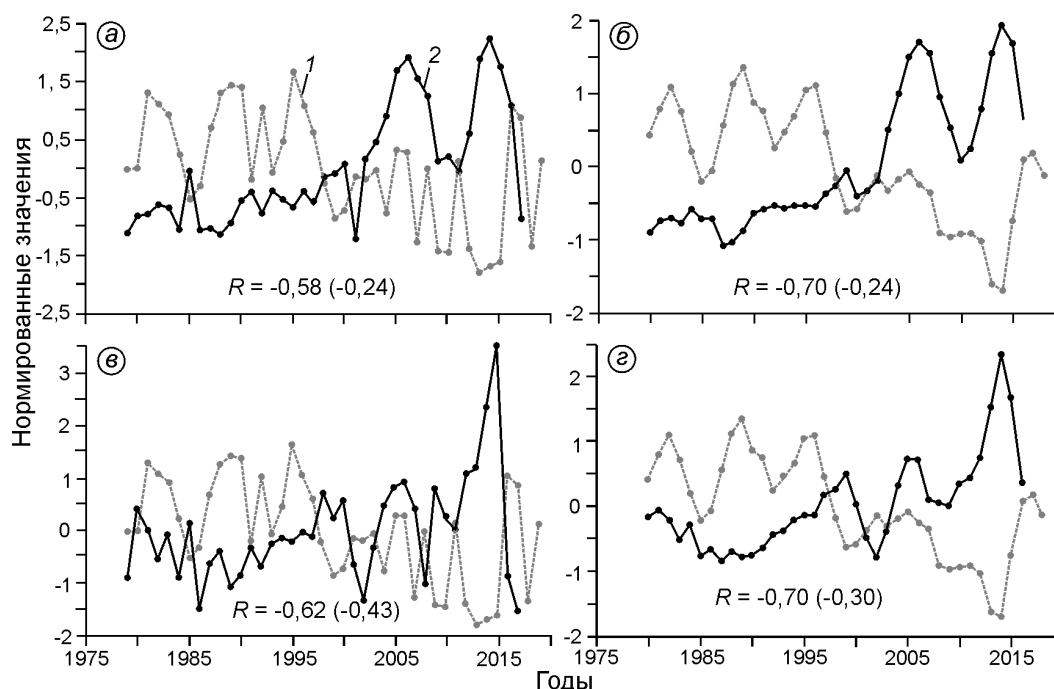


Рис. 4. Нормированные значения средней широты T_{\max} в августе–октябре, средней широты Антарктического полярного фронта и максимальной площади морского антарктического льда в сентябре.

a – широта T_{\max} (1) и Антарктического полярного фронта (2); *б* – то же, после сглаживания по три года; *в* – широта T_{\max} (1) и площадь льда (2); *г* – то же, после сглаживания по три года. R – коэффициент корреляции между (1) и (2). Изменения широты T_{\max} опережают на два года изменения широты АПФ и площади льда

Fig. 4. Normalized values of the average latitude of T_{\max} in August–October (1), the average latitude of the Antarctic polar front, and the maximum of the Antarctic sea ice extent in September.

a – latitude of T_{\max} (1) and Antarctic polar front (2); *б* – the same after smoothing with three years window; *в* – latitude of T_{\max} (1) and sea ice extent (2); *г* – the same after smoothing with three years window. R is the correlation coefficient between (1) and (2). Changes in the T_{\max} latitude are 2 years ahead of changes in the APF latitude and sea ice extent

полушарии. Антарктический полярный фронт ограничивает возможное распространение морского льда на север. Средняя широта АПФ и максимальная площадь льдов в сентябре изменяются год от года согласованно с коэффициентом корреляции $-0,70$ на протяжении 1979–2016 гг.

За 1979–2017 гг. зависимость между суммой градусодней мороза и максимальной площадью льда в сентябре характеризуется коэффициентом корреляции $0,46$, в августе – $0,51$. Согласованные изменения АПФ и площади льда указывают на постепенное смещение АПФ к северу с максимумом в 2014 г. и на рост площади льда от начала наблюдений до 2015 г., после которого произошли смещение АПФ к югу и резкое сокращение площади льда, достигшее минимума в 2017 г. в результате мощного Эль-Ниньо в 2015 г.

Найдено соответствие между аномалиями ТПО в области $5\text{--}25^\circ$ с.ш., $60\text{--}20^\circ$ з.д. и аномалиями положения АПФ и максимальной площа-

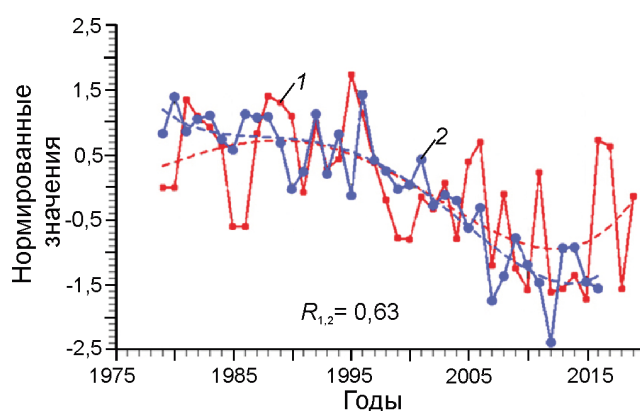


Рис. 5. Нормированные значения средней широты T_{\max} в августе–октябре (1) и площади морского арктического льда в сентябре (2) за 1979–2016 гг.

R – коэффициент корреляции между (1) и (2). Изменения широты T_{\max} опережают на 2 года изменения площади льда

Fig. 5. Normalized values of the average latitude of T_{\max} in August–October (1) and the Arctic sea ice extent in September (2) 1979–2016 after 2 years.

R is the correlation coefficient between (1) and (2)

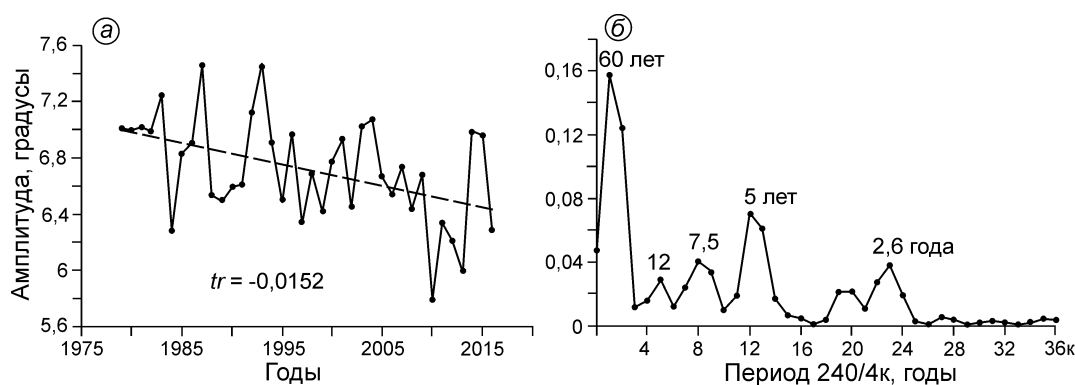


Рис. 6. Характеристики сезонной и межгодовой изменчивости широты T_{\max} :

a — амплитуды сезонных колебаний широты T_{\max} ; *tr* — коэффициент тренда; *b* — спектральная плотность колебаний аномалий широты T_{\max}

Fig. 6. Characteristics of seasonal and interannual variability of T_{\max} latitude:

a — amplitudes of seasonal fluctuations of T_{\max} latitude; *tr* — trend coefficient; *b* — the spectral density of oscillations of the anomalies of the T_{\max} latitude

ди антарктического льда в сентябре при запаздывании аномалий АПФ и площади льда на два года. Коэффициенты корреляции между ними равны $-0,74$ ($-0,34$) и $0,57$ ($0,21$) соответственно (в скобках после удаления тренда). После сглаживания рядов с окном в три года коэффициенты возрастают и соответственно становятся равными $-0,86$ ($-0,49$) и $0,74$ ($0,37$).

Связь между положением максимума ПТВ и максимальной площадью морского антарктического льда во все месяцы года отрицательна, в то время как с площадью морского арктического льда корреляция положительна. Наиболее тесная связь приходится на сентябрь при запаздывании изменений площади льда на два года. При этом наблюдавшиеся до 2016 г. противоположные тренды площадей арктических и антарктических льдов соответствуют смещению положения максимума ПТВ к югу. Динамика аномалий максимума ПТВ может быть проявлением астрономических колебаний в распределении солнечной инсоляции в низких широтах в результате прецессии и нутации оси вращения Земли и колебаний расстояния до Солнца. Аномалии смещения

максимума в сторону экватора соответствуют увеличению инсоляции и формированию аномалий ТПО в низких широтах, влияние которых проявляется в Арктике через механизм циркуляции океана и атмосферы, предложенный в работе [18].

Смещение АПФ к северу и увеличение площади антарктического морского льда в 1979–2015 гг. предположительно связано с увеличением переноса тёплой воды из Южного полушария в результате усиления конвекции в ИТСЗ и интенсификации ячейки Хедли к югу от экватора. Противоположные тенденции в поведении морских льдов Арктики и Антарктики подобны противоположным тенденциям в развитии оледенений в Северном и Южном полушариях, которые отмечены в работе [19] и увязаны с влиянием прецессии оси вращения Земли.

Благодарности. Статья подготовлена с использованием результатов работы по гранту РФФИ 18-05-00334.

Acknowledgments. The article was prepared using the results of the grant from the Russian Foundation for Basic Research 18-05-00334.

Литература

1. Su Z. Preconditioning of Antarctic maximum sea ice extent by upper ocean stratification on a seasonal timescale // *Geophys. Research Letters*. 2017. V. 44. P. 6307–6315.
2. Treshnikov A.F., Alekseev G.V., Sarukhanyan E.I., Smirnov N.P. Water circulation in the Southern Ocean // *Polar Geography and Geology*. 1980. V. 4. № 1. P. 21–35.

References

1. Su Z. Preconditioning of Antarctic maximum sea ice extent by upper ocean stratification on a seasonal timescale. *Geophys. Research Letters*. 2017, 44: 6307–6315.
2. Treshnikov A.F., Alekseev G.V., Sarukhanyan E.I., Smirnov N.P. Water circulation in the Southern Ocean. *Polar Geography and Geology*. 1980, 4 (1): 21–35.

3. Holland P.R. The seasonality of Antarctic sea ice trends // *Geophys. Research Letters*. 2014. V. 41. P. 4230–4237. doi: 10.1002/2014GL060172.
4. Stammerjohn S., Massom R., Rind D., Martinson D. Regions of rapid sea ice change: An interhemispheric seasonal comparison // *Geophys. Research Letters*. 2012. V. 39. L06501. doi: 10.1029/2012GL050874.
5. Turner J., Bracegirdle T.J., Phillips T., Marshall G.J., Hosking J.S. An Initial Assessment of Antarctic Sea Ice Extent in the CMIP5 Models // *Journ. of Climate*. 2013. V. 26. P. 1473–1484. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00068.1.
6. Rosenblum E., Eisenman I. Sea Ice Trends in Climate Models Only Accurate in Runs with Biased Global Warming // *Journ. of Climate*. 2017. V. 30. № 16. P. 6265–6278.
7. Haumann F.A., Notz D., Schmidt H. Anthropogenic influence on recent circulation-driven Antarctic sea ice changes // *Geophys. Research Letters*. 2014. V. 41. P. 8429–8437. doi: 10.1002/2014GL061659.
8. Yuan X., Li C. Climate modes in southern high latitudes and their impacts on Antarctic sea ice // *Journ. of Geophys. Research*. 2008. V. 113. C06S91. doi: 10.1029/2006JC004067.
9. Marshall G.J. Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalyses // *Journ. of Climate*. 2003. V. 16. P. 4134–4143.
10. Parkinson C.L., Cavalieri D.J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *Cryosphere*. 2012. V. 6. P. 871–880. doi: 10.5194/tc-6-871-2012.
11. Kwok R., Comiso J., Lee T., Holland P. Linked trends in the South Pacific sea ice edge and Southern Oscillation Index // *Geophys. Research Letters*. 2016. V. 43. P. 10,295–10,302. doi: 10.1002/2016GL070655.
12. Smith D.M., Dunstone N.J., Scaife A.A., Fiedler E.K., Copsey D., Hardiman S.C. Atmospheric Response to Arctic and Antarctic Sea Ice: The Importance of Ocean – Atmosphere Coupling and the Background State // *Journ. of Climate*. 2017 V. 30. P. 4547–4564.
13. Latif M., Torge M., Park W. Southern Ocean Sector Centennial Climate Variability and Recent Decadal Trends // *Journ. of Climate*. 2013. V. 26. P. 7767–7782.
14. Armor K.C., Marshall J., Scott J.R., Donohoe A., Newsom E.R. Southern Ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9. P. 554–549. doi: 10.1038/ngeo2731.
15. Li X., Holland D.M., Gerber E.P., Yoo C. Impacts of the north and tropical Atlantic Ocean on the Antarctic Peninsula and sea ice // *Nature*. 2014. V. 505. № 7484. P. 538–542.
16. Bintanja R., Oldenborgh G.J., Drijfhout S.S., Wouters B., Katsman C.A. Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion // *Nature Geoscience*. 2013. V. 6. P. 376–379. doi: 10.1038/ngeo1767.
17. Zhang J. Increasing Antarctic sea ice under warming atmospheric and oceanic conditions // *Journ. of Climate*. 2007. V. 20. № 11. P. 2515–2529.
18. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57. № 3. С. 381–390. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-381-390.
19. Соломина О.Н. Колебания ледников в голоцене и возможное влияние на них орбитального сигнала, солнечной и вулканической активности и антропогенного воздействия // *Лёд и Снег*. 2014. Т. 54. № 3. С. 81–90.
3. Holland P. R. The seasonality of Antarctic sea ice trends. *Geophys. Research Letters*. 2014, 41: 4230–4237. doi: 10.1002/2014GL060172.
4. Stammerjohn S., Massom R., Rind D., Martinson D. Regions of rapid sea ice change: An interhemispheric seasonal comparison. *Geophys. Research Letters*. 2012, 39: L06501. doi: 10.1029/2012GL050874.
5. Turner J., Bracegirdle T.J., Phillips T., Marshall G.J., Hosking J.S. An Initial Assessment of Antarctic Sea Ice Extent in the CMIP5 Models. *Journ. of Climate*. 2013, 26: 1473–1484. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00068.1.
6. Rosenblum E., Eisenman I. Sea ice trends in climate models only accurate in runs with biased global warming. *Journ. of Climate*. 2017, 30 (16): 6265–6278.
7. Haumann F.A., Notz D., Schmidt H. Anthropogenic influence on recent circulation-driven Antarctic sea ice changes. *Geophys. Research Letters*. 2014, 41: 8429–8437. doi: 10.1002/2014GL061659.
8. Yuan X., Li C. Climate modes in southern high latitudes and their impacts on Antarctic sea ice. *Journ. of Geophys. Research*. 2008, 113: C06S91. doi: 10.1029/2006JC004067.
9. Marshall G.J. Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalyses. *Journ. of Climate*. 2003, 16: 4134–4143.
10. Parkinson C.L., Cavalieri D.J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *Cryosphere*. 2012, 6: 871–880. doi: 10.5194/tc-6-871-2012.
11. Kwok R., Comiso J., Lee T., Holland P. Linked trends in the South Pacific sea ice edge and Southern Oscillation Index. *Geophys. Research Letters*. 2016, 43: 10,295–10,302. doi: 10.1002/2016GL070655.
12. Smith D.M., Dunstone N.J., Scaife A.A., Fiedler E.K., Copsey D., Hardiman S.C. Atmospheric Response to Arctic and Antarctic Sea Ice: The Importance of Ocean– Atmosphere Coupling and the Background State. *Journ. of Climate*. 2017, 30: 4547–4564.
13. Latif M., Torge M., Park W. Southern Ocean Sector Centennial Climate Variability and Recent Decadal Trends. *Journ. of Climate*. 2013, 26: 7767–7782.
14. Armor K.C., Marshall J., Scott J.R., Donohoe A., Newsom E.R. Southern Ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport. *Nature Geoscience*. 2016, 9: 554 –549. doi: 10.1038/ngeo2731.
15. Li X., Holland D. M., Gerber E. P., Yoo C. Impacts of the north and tropical Atlantic Ocean on the Antarctic Peninsula and sea ice. *Nature*. 2014, 505 (7484): 538–542.
16. Bintanja R., Oldenborgh G.J., Drijfhout S.S., Wouters B., Katsman C.A. Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion. *Nature Geoscience*. 2013, 6: 376–379. doi:10.1038/ngeo1767.
17. Zhang J. Increasing Antarctic sea ice under warming atmospheric and oceanic conditions. *Journ. of Climate*. 2007, 20 (11): 2515–2529.
18. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V. Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 381–390. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-381-390. [In Russian].
19. Solomina O.N. Holocene glacier variations and their potential orbital, solar, volcanic and anthropogenic forcings. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 54 (3): 81–90. [In Russian].