ORES
Научно-практический электронный журнал
Оригинальные исследования (ОРИС), *ISSN 2222-0402*
www.ores.su
original-research.ru

УДК [551.467:551.583](268+269)

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДОВИТОСТИ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО И ЮЖНОГО ОКЕАНОВ

Даньшина Анна Владимировна,
кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Россия, Санкт-Петербург
danshina@aari.ru

Чанцев Валерий Юрьевич,
кандидат географических наук, доцент ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», Россия, Санкт-Петербург
chantsev@hotmail.com

Аннотация

Данное исследование построено на комплексном изучении временной структуры, межгодовой изменчивости и пространственно-временной сопряженности площади ледяного покрова Арктического и Антарктического регионов с целью снижения неопределенности в долгосрочном климатическом прогнозировании. В качестве информационной базы использовались наборы данных по ледовитости, охватывающие период 1979–2025 гг. Установлено, что динамика ледовитости полярных областей характеризуется полугодовым фазовым сдвигом и выраженной климатической асимметрией. В Северном Ледовитом океане зафиксирован устойчивый монотонный тренд к сокращению площади льда (более чем на 2 млн км² за исследуемый период), описываемый линейной моделью с замедлением темпов таяния после 2015 года. Напротив, ледовая система Южного океана демонстрирует высокую нелинейность. В её эволюции выделены три эпохи: медленный рост до исторического максимума в 2014 году (>12,5 млн км²), резкий коллапс в 2015–2023 гг. (падение на 2,5 млн км²) и слабая стабилизация в последние годы. Вейвлет-анализ очищенных от тренда рядов выявил точечные вспышки спектральной мощности в Арктике на периоде 1 год, приуроченные к экстремальным годам (2012 и 2020 гг.), а также наличие циклов с периодами 5 и 11 лет колебаний ледовитости Арктики и Антарктики.

Ключевые слова: Морской лед, ледовитость, Северный Ледовитый океан, Южный океан, полярная асимметрия, вейвлет-анализ Морле, климатический тренд, кросс-корреляция, кросс-вейвлет спектр.

CLIMATIC CHANGES OF SEA ICE EXTENT IN THE ARCTIC AND SOUTHERN OCEANS

Danshina Anna Vladimirovna,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), Russia, St. Petersburg

danshina@aari.ru

Chantsev Valery Yuryevich,
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University (RSHU), Russia, St. Petersburg chantsev@hotmail.com

ABSTRACT

This study aims to provide a comprehensive investigation of the temporal structure, interannual variability, and spatiotemporal coupling of the ice cover area in the Arctic and Antarctic regions to reduce uncertainties in long-term climate forecasting. The ice extent datasets covering the 1979–2025 period were utilized as the information base. It was established that the ice extent dynamics of the polar regions are characterized by a half-year phase shift and a pronounced climate asymmetry. A stable, monotonic trend toward ice area reduction (by more than 2 million km² over the study period) was recorded in the Arctic Ocean, which is well-described by a linear model, with a slowdown in melting rates after 2015. In contrast, the ice system of the Southern Ocean exhibits high nonlinearity. Three distinct epochs were identified in its evolution: a slow growth up to the historical maximum in 2014 (>12.5 million km²), a sharp collapse in 2015–2023 (a drop of 2.5 million km²), and a weak stabilization in recent years. Wavelet analysis of the detrended series revealed localized spectral power bursts in the Arctic at a 1-year period, corresponding to extreme years (2012 and 2020), as well as the presence of 5- and 11-year cycles in the ice extent fluctuations of the Arctic and Antarctica.

Keywords: Sea ice, ice extent, Arctic Ocean, Southern Ocean, polar asymmetry, Morlet wavelet analysis, climate trend, cross-correlation, cross-wavelet spectrum.

Введение

Необходимость исследования климатических изменений ледовитости Северного Ледовитого (СЛО) и Южного океанов опирается на их ключевую роль в глобальной климатической системе и мировой экономике. Морской лед служит ключевым индикатором и одновременно мощным регулятором энергетического баланса Земли. Сокращение его площади обнажает морскую поверхность, которая поглощает больше солнечной радиации, чем лед, и вызывает постоянный нагрев (так называемый «эффект арктического усиления») [1, 2]. Скорость потепления в Арктике более чем в 3–4 раза превышает среднепланетарную, а значит исследование временной изменчивости ледовитости критически важно для точности климатического прогнозирования.

СЛО и Южный океан демонстрируют противоположную ледовую динамику, что требует комплексного сравнительного анализа. Если в Арктике наблюдается значимый отрицательный тренд ледовитости во все сезоны, то в Антарктике длительное время до середины 2010-х годов отмечался слабый рост, а начиная с периода 2016–2023 гг. наметился существенный тренд на снижение ледовитости. Такой режим впервые фиксируется за всю историю спутниковых наблюдений. По всей видимости, это может грозить переходом Антарктики из ограничителя глобального потепления в его ускоритель. Понимание этого парадокса — ключ к расшифровке внутренней изменчивости климатической системы [3-5].

Таяние льдов на акватории СЛО и выявленные осцилляции ледовитости Южном океане меняют баланс между пресной и соленой водой. Поступление пресной воды в полярные регионы в результате таяния льда замедляет глубокую конвекцию, что влияет на

перемещение водных масс и основных течений. Стабильность ледяного покрова определяет плотность придонных вод Южного океана и Североатлантических глубинных вод. При замерзании воды выделяется соль, увеличивая плотность подледных вод, что запускает глобальный океанический «конвейер» (глобальную циркуляцию). Изменения в этих зонах могут перестроить климат практически на всей планете [6, 7].

Трансформация ледового режима полярных широт открывает новые экономические возможности, сопряженные с рисками. Снижение ледовитости увеличивает навигационное окно Северного морского пути, делая его коммерчески привлекательным. Однако исчезновение припайных льдов ускоряет термоабразию берегов, разрушая портовую и промышленную инфраструктуру [8].

Таким образом, цель работы основывается на том, что исследование климатических изменений ледовитости СЛО и Южного океана продиктовано необходимостью снижения неопределенности в долгосрочных прогнозах глобального потепления. Полярные ледяные шапки выступают главными индикаторами и катализаторами изменений. Деградация ледяного покрова запускает каскадные эффекты — от трансформации термохалинной структуры [9, 10] океанов до перестройки уязвимых морских экосистем и изменения условий навигации на важнейших транспортных артериях [11].

Материалы и методы

В качестве исходных данных для исследования временной динамики ледовитости полярных областей использовались массивы данных Мирового центра данных по морскому льду (МЦД МЛ (WDC)) [12], в основу которого заложены данные с дискретностью 1–2 суток пассивного микроволнового зондирования полярных областей SSMR-SSM/I-SSMIS по алгоритму NASATEAM, копируемые МЦД МЛ из архива данных “Национального центра данных США по снегу и льду” (NSIDC). В работе обрабатывались осредненные за месяц значения площади морского льда в Арктике и Антарктике за период с 1979 по 2025 гг.

Для анализа временной структуры исследуемых рядов использовался аппарат математической статистики [13, 14, 15]. Так для выделения климатических аномалий использовалась внутригодовая фильтрация, заключающаяся в высокоразрешающем алгоритме со среднемесячным интервалом дискретизации за период 1979–2025 гг. Для этого многолетняя климатическая норма (Sm) для каждого календарного месяца, рассчитывалась как:

$$S(m) = \frac{1}{N_Y} \sum_{k=0}^{N_Y-1} S_{ice}(m+12k) \quad (1)$$

Где NY – общее количество лет; m – номер месяца.

Тогда аномалия площади льда (S'_{ice}) для каждого месяца временного ряда будет определяться выражением

$$S'_{ice}(t_m) = S_{ice}(t_m) - S(m) \quad (2)$$

На основании рассчитанных аномалий пощади льда можем выявить тренд, представляющий собой полином третьего порядка, который позволяет увидеть особенности временной изменчивости площади ледяного покрова арктического и антарктического регионов.

$$T_S(t_m) = a_0 + a_1 t_m + a_2 t_m^2 + a_3 t_m^3 \quad (3)$$

Где коэффициенты a0, a1, a2, a3 находятся методом наименьших квадратов.

Для локализации энергетических перестроек временного ряда применен материнский комплексный вейвлет Морле [13]

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{B \cdot \pi}} e^{-\frac{t^2}{B}} e^{i2\pi \cdot \omega_0 \cdot t} \quad (4)$$

Где B – полоса пропускания (или широта окна), ω0=6 – центральная частота вейвлета, t – время.

Глобальный вейвлет-спектр мощности для $\overline{P}^2(s)$ на интервале времени от 0 до T рассчитывался как интегральное среднее по всей временной области:

$$\overline{P}^2(s) = \frac{1}{T}\int_0^T |P(t,s)|^2 dt \quad (5)$$

Где s – масштабный коэффициент (отвечает за частоту), P(t,s) – непрерывное вейвлет-преобразование ряда S'_{ice}

$$P(t,s) = \frac{1}{\sqrt{s}}\int_{-\infty}^{+\infty} S'_{ice}(\tau)\psi^*\left(\frac{\tau - t}{s}\right) d\tau \quad (6)$$

Для выявления фазовых соотношений и областей совместной высокой мощности временных рядов Арктики и Антарктики применялись кросс-вейвлетный анализ и вейвлет-когерентность в соответствии с алгоритмами, адаптированными для геофизических данных в работе [14].

Для оценки пространственно-временной сопряженности и направления переноса климатического импульса рассчитывалась функция взаимной корреляции Пирсона [15].

Результаты исследования и их обсуждение

Временная динамика площади морского льда в Арктике и Антарктике имеет ярко выраженный сезонный характер и имеет полугодовой фазовый сдвиг относительно друг друга. Однако, в межгодовой изменчивости площади ледяного покрова между двумя полярными областями наблюдается достаточно существенное различие, которое заметно проявляется в распределении временных трендов и в спектральном наполнении.

За период регулярных исследований с 1979 по 2025 год общая ледовитость (площадь морского льда) СЛО продемонстрировала устойчивый и долгосрочный тренд к сокращению, став одним из главных индикаторов глобального изменения климата.

Так, в эволюции площади морского льда СЛО отрицательный тренд с разной интенсивностью прослеживается на протяжении всего периода с 1979 по 2025 гг. со среднегодовой амплитудой ~ 5 тыс. км2 (рис. 1а). Рассматриваемый период можно разделить на три части. Период времени до 1990 года демонстрирует стабильный период максимальной ледовитости СЛО, что подтверждается распределением кубического тренда, уровень значимости которого обеспечивается высоким значением коэффициента детерминации (R2 = 0,9236). В период с 1990 по 2015 год прослеживается резкое снижение площади морского льда на акватории СЛО. После 2015 года снижение средней ледовитости замедлилось. В целом за период 1979–2025 гг. площадь льда уменьшилась более чем на 2 млн. км2.

Межгодовая динамика морского льда Южного океана демонстрирует нелинейную и нестабильную систему. Здесь, как и в Арктике, прослеживаются три четко выраженные климатические эпохи (рис. 1б). Период с 1979 по 2014 гг. можно назвать эпохой медленного роста, когда площадь льда совершала колебания, но генеральная траектория шла вверх. В 2014 году был достигнут абсолютный исторический максимум за весь период наблюдений — более 12,5 млн. км2. Сразу после пика в 2015 году система резко развернулась вниз (эпоха коллапса). Всего за 9 лет площадь льда уменьшилась до своего абсолютного исторического минимума в 2023 году — менее 10,0 млн. км2. За период менее 10 лет падение составило 2.5

млн. км2. В последние два года наметился слабый компенсационный отскок вверх (эпоха стабилизации), но система все еще находится на критически низких отметках.

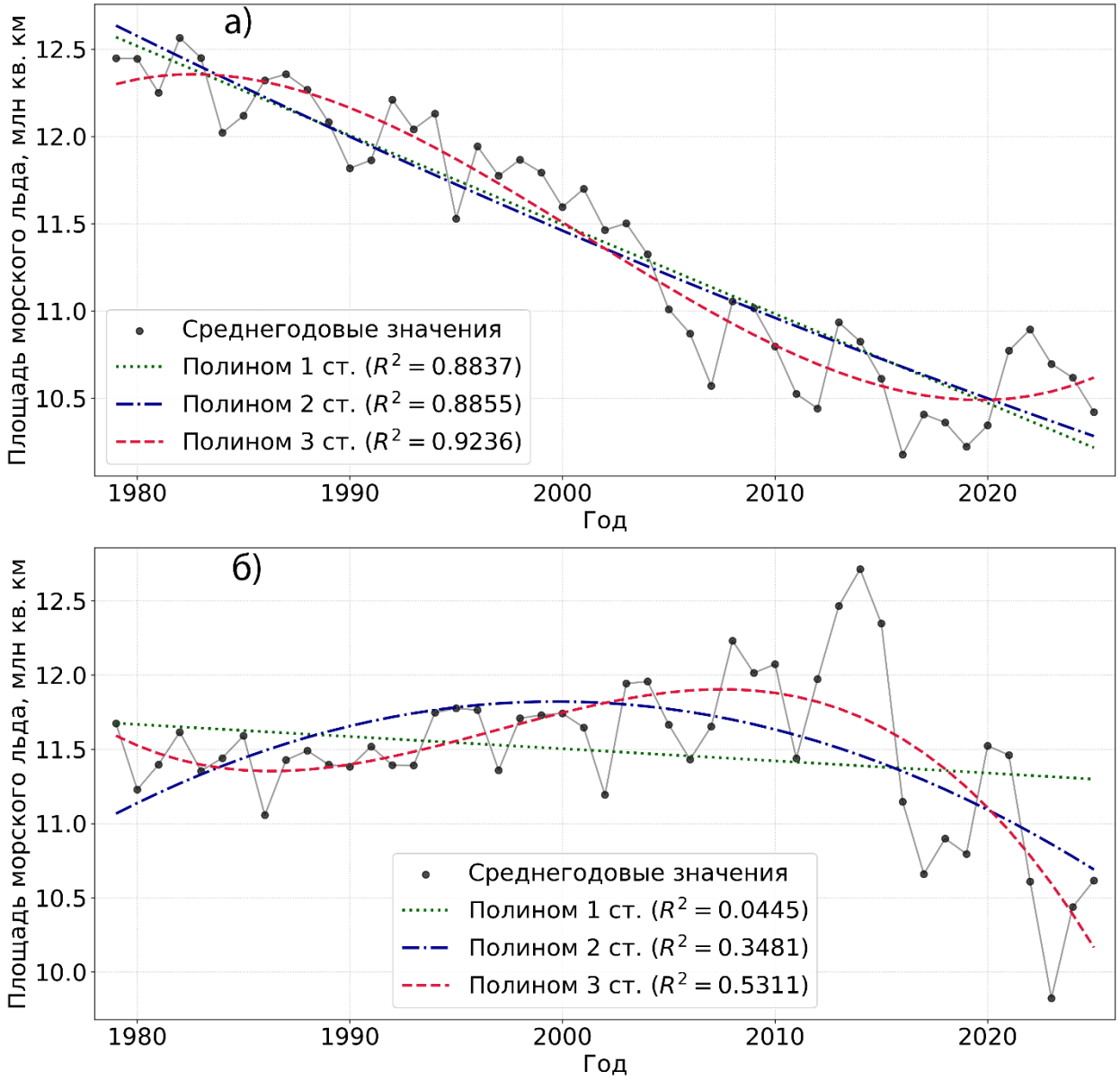


Рисунок 1 – Эволюция площади морского льда в Арктике (а) и Антарктике (б)

Представленные графики демонстрируют полярную асимметрию климата. В Арктике идет монотонный, предсказуемый процесс таяния (R2 ≈0,88), полностью подчиненный линейному тренду. В Антарктике линейного тренда нет (R2 ≈ 0,04), а ледовая система подвержена резким качественным скачкам и режимным перестройкам, которые лучше всего улавливает кубическая модель.

На фоне долгопериодной изменчивости ледовитости наблюдается достаточно широкий спектр короткопериодной межгодовой изменчивости. Характер распределения спектральной мощности на интервале в 47 лет хорошо проявляется на вейвлет-скалограмме (рис. 2). Удаление кубического тренда полностью раскрыло внутренние автоколебания систем. Хорошо выделяются два локальных, статистически значимых колебания ледовитости с периодами 1 год в 2012-2013 г (год экстремального исторического минимума льда в Арктике) и в 2020-2021 годах (рис. 2а).

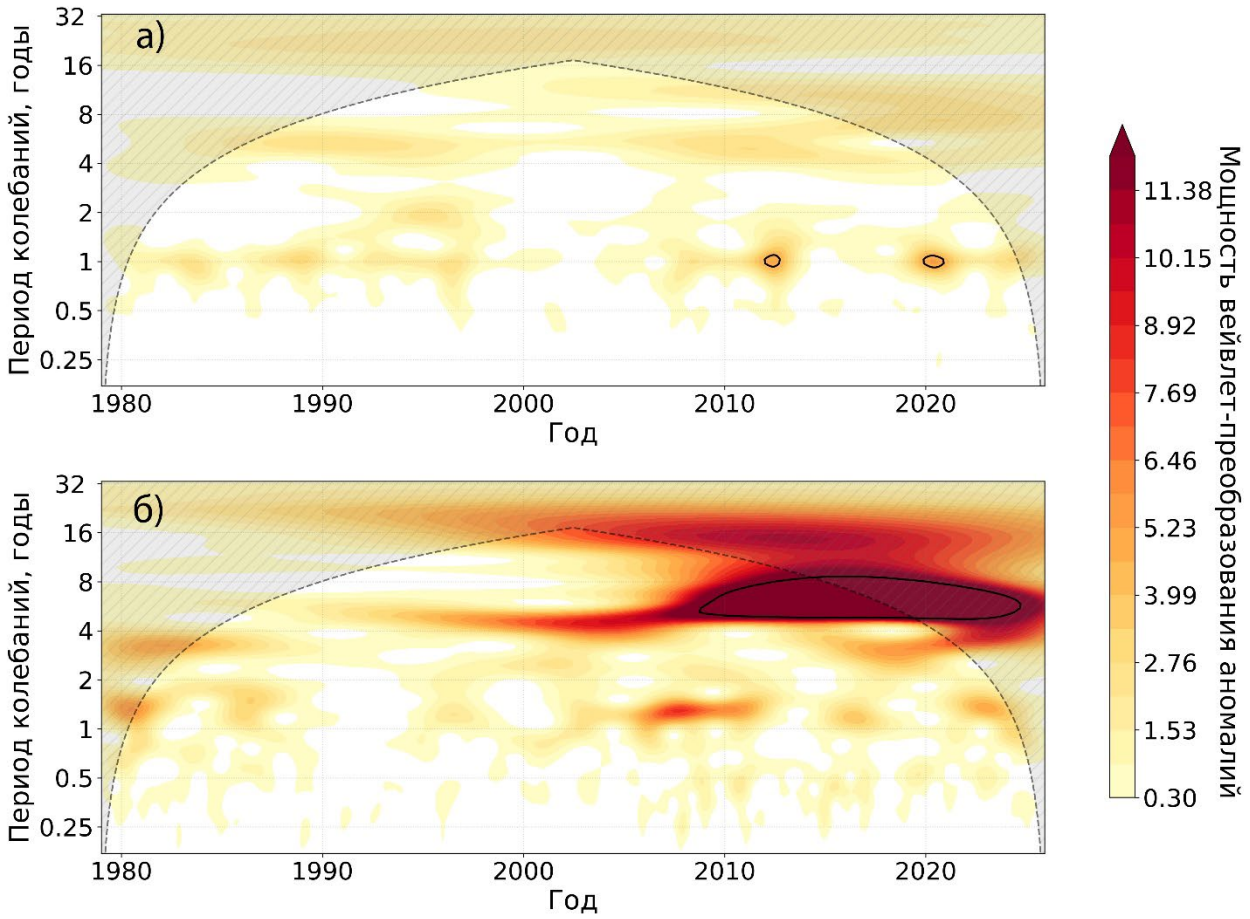


Рисунок 2 – Вейвлет-скалограмма межгодовых аномалий ледяного покрова для Арктики (а) и Антарктике (б) (кубический детрендинг)

Менее мощные значимые полосы колебаний площади льда в СЛО прослеживаются и на периодах ~5 и 11 лет. Внутридесятилетняя изменчивость Арктики после удаления макротренда оказалась достаточно стабильной и спокойной. Вспышки значимости носят точечный характер на периоде 1 год, фиксируя экстремальные штормовые годы (2012 и 2020 гг.). В Южном океане сформировалось четко выраженное, изолированное ядро максимальной мощности. Оно локализовано строго на периодах от 4 до 8 лет (с пиком в районе 5.5 года) и длится непрерывно с 2008 по 2023 год (рис. 2б). Вейвлет-скалограмма неопровержимо доказывает, что катастрофический коллапс ледовитости в Антарктике после 2015 года не был случайным однолетним сбоем. Ему предшествовала мощная циклическая перестройка океана и атмосферы на периоде ~5.5 лет, которая непрерывно разгонялась в Южном океане, начиная с 2008 года, и достигла своего апогея к 2020-м годам. Ядро спектральной мощности в Антарктике имеет под собой мощную физическую основу. В климатологии Южного океана этот диапазон частот контролируется главными взаимосвязанными процессами в атмосфере и океане.

Графики глобального вейвлет-спектра позволяют более точно увидеть значимые пики в колебаниях спектральной мощности ледовитости (рис. 3). Включение кубического детрендинга оставляет неизменными пики на коротких периодах: Ранг 1 прочно удерживает колебания с периодом 5,2 года, Ранг 2 — 1,03 года (рис. 3а). Однако происходит важнейшая перестройка низкочастотной зоны: пик Ранг 3 приходится на период 11,02 года, а его интенсивность заметно снижается (до 1,1).

Квазипятилетняя климатическая мода (5.2 года, отклик на ENSO) фундаментальна и инвариантна к глубине детрендинга [16, 17]. Кубический полином позволил прецизионно очистить спектр и выделить чистый 11-летний цикл Швабе для солнечной активности и Североатлантической осцилляции.

В отличие от Арктики, спектр Антарктики значительно трансформируется при повышении степени полинома тренда, так как ледовая система Южного океана претерпела резкий S-образный перелом климатического режима после 2015 года. Кубический фильтр забирает на себя значительную часть энергии долгопериодного «купола» макроизменений. Происходит кардинальная спектральная сепарация и улучшение графика. Поскольку кубическая функция идеально ложится на S-образный перелом тренда Антарктики, она полностью поглощает его ложную энергию.

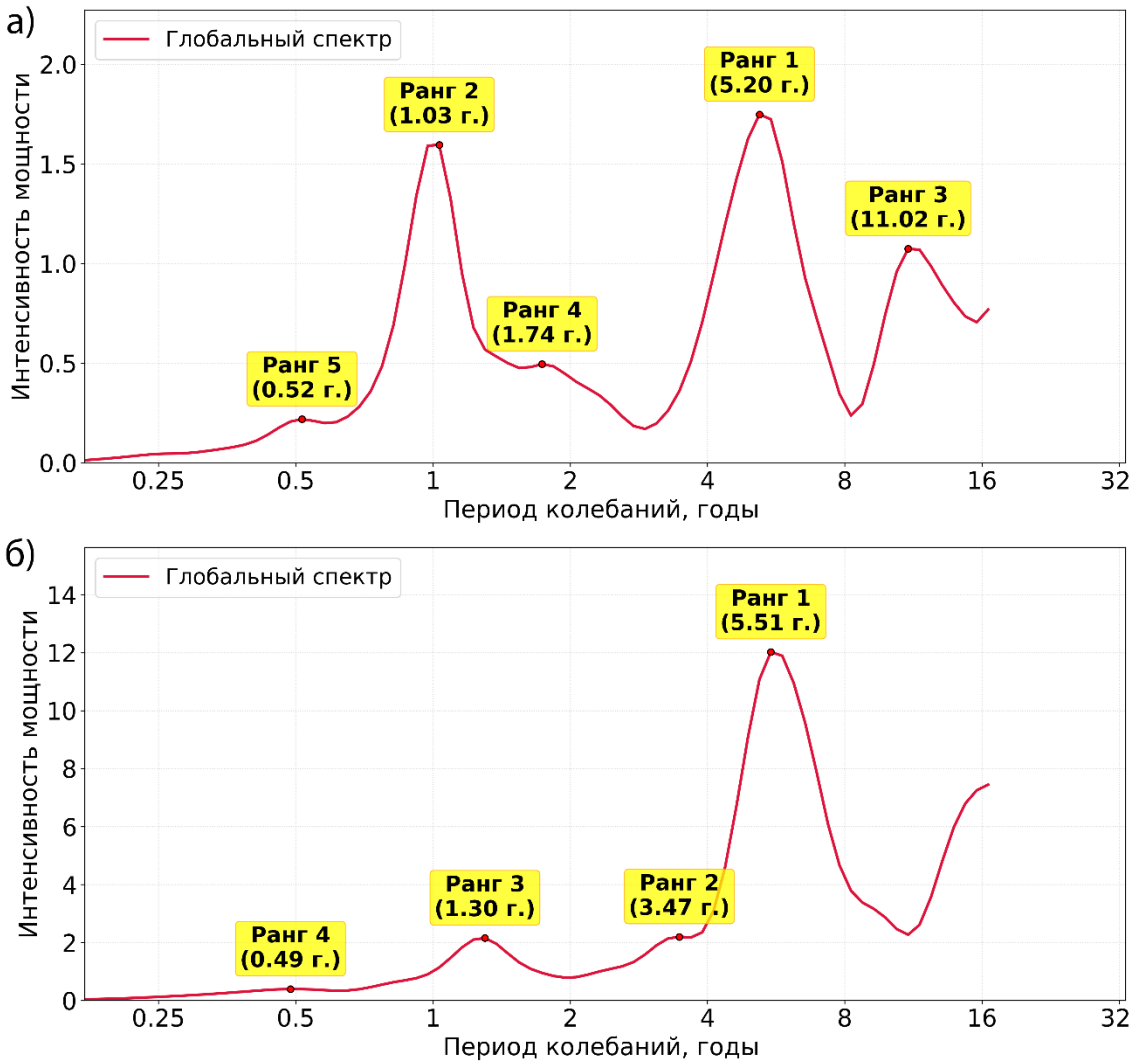


Рисунок 3 – Глобальный спектр вейвлет-мощности аномалий площади морского льда для Арктики(а) и для Антарктики(б) (кубический детрендинг)

Для выявления физических связей между ледовитостью СЛО и Южного океана были привлечены механизмы анализа, такие как Кросс-вейвлетный спектр мощности и вейвлет-когерентность (рис. 4). На графике кросс-вейвлетного спектра (рис. 4а) четко выделяется мощное изолированное ядро в диапазоне периодов от 4 до 8 лет, локализованное строго после 2005–2008 гг.

Внутри этого критического диапазона отмечается то, что в период климатического сдвига XXI века межгодовые аномалии полярных льдов на Севере и на Юге начали пульсировать в фазе (синхронно). Отклонение стрелок вверх указывает на то, что Арктика имеет минимальное фазовое опережение (сигнал на этих частотах зарождается в Северном полушарии и спустя короткое время откликается в Южном).

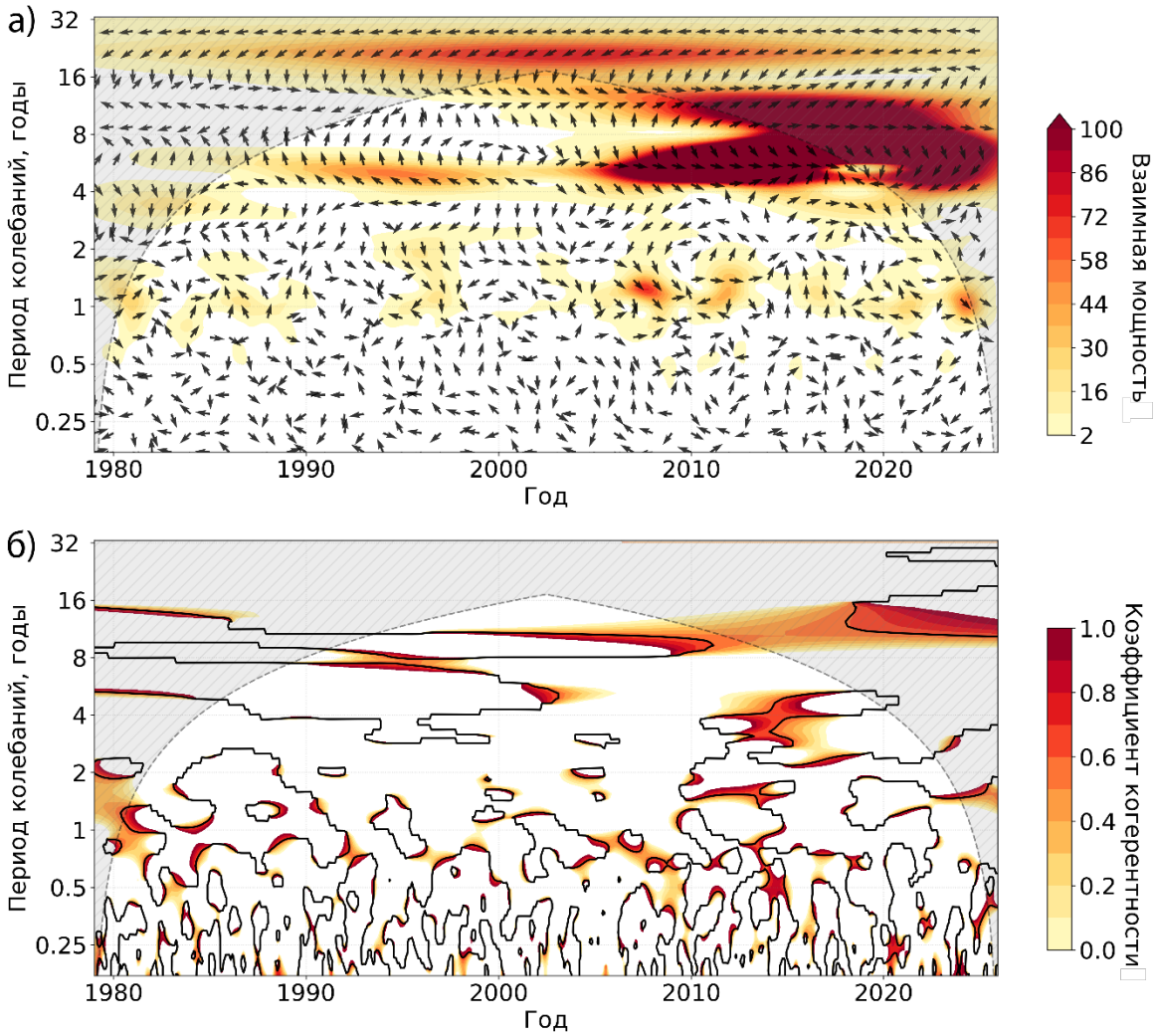


Рисунок 4 – Метрики взаимного вейвлет-анализа: кросс-вейвлетный спектр мощности (а) и вейвлет-когерентность (б) (кубический детрендинг)

Кубический фильтр раскрыл структуру когерентности. На фоне общего снижения шумов ярко проявились два независимых и физически обусловленных ядра межполушарной связи (рис. 4б). Междекадное ядро с периодом ~11 лет (1995–2015 гг.), которое отражает долговременную синхронизацию систем под воздействием глобального 11-летнего солнечного цикла Швабе. С другой стороны, внутридесятилетнее ядро с периодом 4–6 лет (после 2010 г.) представляет собой маркер резкого усиления экваториального «атмосферного моста» ENSO и SAM в последние полтора десятилетия, который заставил оба полюса планеты таять синхронными импульсами [18, 19].

Выявление причинно-следственных связей между полярными областями планеты основывается на проведении взаимно-корреляционного анализа (рис. 5).

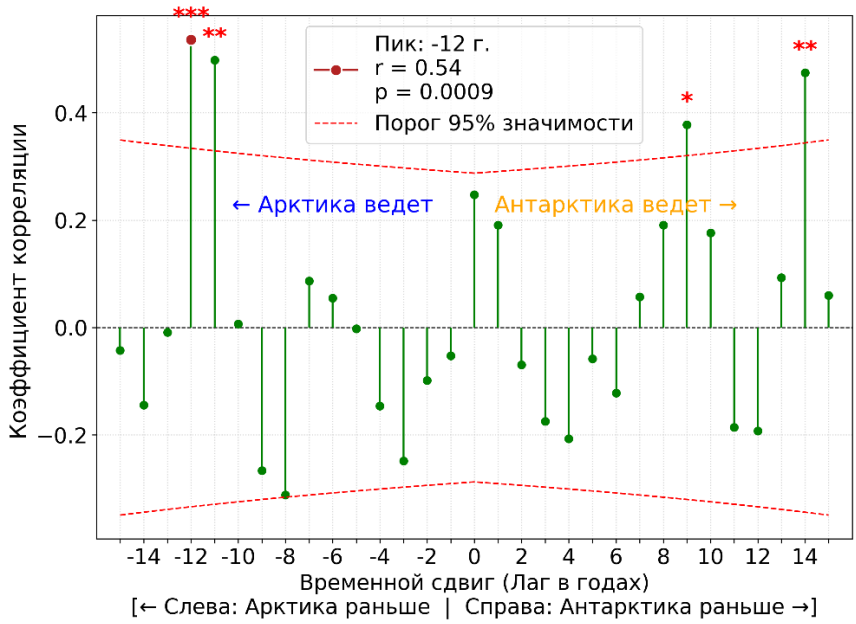


Рисунок 5 – Взаимная кросс-корреляция между среднегодовыми аномалиями площади льда Арктики и Антарктики с различными временными сдвигами

Кубический полином полностью вырезал S-образную вековую волну и все среднесрочные климатические шумы. Видно, что пик -12 лет выстоял и имеет большое значение. Это доказывает, что 12-летний лаг океанического конвейера из Арктики в Антарктику — это фундаментальный физический мост, связывающий ледовые экосистемы полюсов Земли. Он работает на уровне чистых колебаний и независим от любых макротрендов потепления.

Заключение

Анализ глобальных вейвлет-спектров выявил фундаментальную зависимость достоверности спектральных оценок от степени полиномиального детрендинга, обусловленную межполушарной асимметрией полярного климата. Для Арктического бассейна, где деградация льда носит характер близкий к линейному, усложнение фильтра не искажает доминирующую моду ENSO (5,2 года), но обеспечивает прецизионную коррекцию долгопериодного пика, смещая его от завышенного значения к фундаментальному периоду 11,02 года (цикл Швабе).

В то же время для Антарктической ледовой системы, переживающей резкий нелинейный режимный сдвиг после 2015 г., применение кубического детрендинга позволило полностью демпфировать энергию S-образного векового перелома, скорректировать истинный период климатического резонанса Южного океана до 5,5 года и успешно верифицировать скрытую среднечастотную моду изменчивости с периодом 3,47 года, ассоциируемую с пульсациями Южной кольцевой моды (SAM).

Анализ пространственно-временной сопряженности ледовых аномалий методами кросс-вейвлетного преобразования и вейвлет-когерентности подтвердил решающую роль кубического детрендинга для корректной физической интерпретации связей.

На очищенном поле кросс-вейвлета верифицировано мощное изолированное ядро взаимной мощности в диапазоне периодов 4–8 лет, активизировавшееся после 2005–2008 гг. Тригонометрическая ориентация фазовых векторов в данном ядре (направлены вправо и вверх) строго доказывает, что в эпоху современного климатического сдвига аномалии площади льда в Арктике и Антарктике функционируют в синфазном (синхронном) режиме при незначительном фазовом опережении со стороны Северного полушария.

Результаты анализа вейвлет-когерентности подтверждают двухканальный механизм межполушарной синхронизации: долгопериодный канал (период ~11 лет в интервале 1995–2015 гг.), модулируемый глобальным солнечным циклом, и короткопериодный импульсный канал (период 4–6 лет после 2010 г.), отражающий резкую активизацию атмосферно-океанических взаимосвязей ENSO—SAM в текущем столетии.

Анализ взаимно-корреляционных функций позволил установить точные временны́е задержки межполушарного климатического отклика и определить ведущие регионы в полярной связке. Расчеты выявили фундаментальный океанический мост, характеристики которого трансформируются в зависимости от глубины детрендинга.

Критически важным результатом стала проверка стабильности связей при кубическом детрендинге (Рисунок 5). Жесткое удаление S-образного векового макротренда привело к полному подавлению промежуточных шумов и исчезновению кратковременных атмосферных лагов. Однако междекадный пик на лаге -12 лет полностью сохранил свою статистическую состоятельность и наивысший уровень значимости ($r = +0{,}54$, $p < 0{,}001$). Данный факт эмпирически доказывает, что 12-летняя океаническая задержка переноса аномалий из Северного полушария в Южное является инвариантным, фундаментальным физическим процессом, определяющим долгосрочную сопряженность криосферы полюсов Земли. Полученные результаты расширяют представление о механизмах глобального океанического «конвейера» и способствуют пониманию долгосрочных климатических изменений не только в мировом океане, но и на всей планете.

Список литературы:

1. Stroeve, J., Notz, D. Changing state of Arctic Sea ice across all seasons // Environmental Research Letters. 2018. Vol 13. № 10. 103001. 23 P.
2. Stuecker M. F., Bitz C. M., Armour, K. C., et al. Polar amplification dominated by local feedbacks and feedbacks from the tropics // Nature Climate Change. 2018. Vol 8. Pp.1011–1017.
3. Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta, S., et al. Polar Regions / IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC). 2019. Pp. 205–320.
4. Parkinson, C. L. A 40-Y Record Reveals Gradual Antarctic Sea Ice Increases Followed by Decreases at Rates Far Exceeding the Rates Seen in the Arctic // Proc. of the National Academy of Sciences. 2019. Vol 116. № 29. Pp. 14414–14423.
5. Purich, A., Doddridge, E. W. Record low Antarctic sea ice coverage indicates a new sea ice state // Communications Earth & Environment. 2023. Vol 4 № 1. Pp. 314 –317.
6. Purkey S. G., Johnson, G. C. (2013). Warming and freshening of Antarctic Bottom Water // Journal of Climate. 2013. Vol 26. № 16. Pp. 6105–6122.
7. Polyakov I. V., Pnushkov A., Alkire M.B., et al. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Science. 2017. Vol 356, Pp. 285–291.
8. Огородов С. А., Шабанова Н.Н., Кессель А.С., Баранская А.В., Разумов С.О. Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. №1. С.26–42.
9. Иванов В.В., Даньшина А.В., Смирнов А.В. Пространственно-временная структура и изменчивость термохалинных параметров в промежуточном слое вод к северу от архипелага северная земля // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18. № 2. С. 19–40.

10. Даньшина А.В. Пространственно-временные изменения характеристик слоя атлантических вод бассейна Нансена // Тезисы докладов VIII Всероссийской научной конференции «Моря России: современные методы исследований и их практические применения». 2024. С. 142–143.
11. Ерохин В.Л. Влияние изменения климата на открытие морских транспортных путей в морях Северного Ледовитого океана // Маркетинг и логистика. 2018. №5 (19). С. 32–45.
12. Мировой центр данных по морскому льду [Элетронный ресурс]. URL: http://wdc.aari.ru (дата обращения 01.08.2026).
13. Torrence C., Compo G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 2018. Vol 79. №1. Pp. 61–78.
14. Grinsted A., Moore J. C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Processes in Geophysics. 2004. Vol 11. P. 561–566.
15. Box G. E. Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time series analysis: forecasting and control. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2015. 712 P.
16. Turner J., Phillips T., Hosking S., Marshall G.J., The Amundsen Sea Low // International Journal of Climatology. 2013. Vol 33. № 7. Pp. 1818–1829.
17. Yuan X., Martinson D. G. Antarctic Antarctic Dipole: A teleconnection in polar climate // Journal of Climate. 2001. Vol 14. № 11. Pp. 2464–2475.
18. Marshall G. J. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses // Journal of Climate. 2003. Vol 16. № 24. Pp. 4134–4143.
19. Thompson D. W., Solomon S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change // Science. 2002. Vol 296. Pp. 895–899.

References:

1. Stroeve, J., Notz, D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons // Environmental Research Letters. 2018. Vol 13. № 10. 103001. 23 P.
2. Stuecker M. F., Bitz C. M., Armour, K. C., et al. Polar amplification dominated by local feedbacks and feedbacks from the tropics // Nature Climate Change. 2018. Vol 8. Pp.1011–1017.
3. Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta, S., et al. Polar Regions / IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC). 2019. Pp. 205–320.
4. Parkinson, C. L. A 40-Y Record Reveals Gradual Antarctic Sea Ice Increases Followed by Decreases at Rates Far Exceeding the Rates Seen in the Arctic // Proc. of the National Academy of Sciences. 2019. Vol 116. № 29. Pp. 14414–14423.
5. Purich, A., Doddridge, E. W. Record low Antarctic sea ice coverage indicates a new sea ice state // Communications Earth & Environment. 2023. Vol 4 № 1. Pp. 314–317.
6. Purkey S. G., Johnson, G. C. (2013). Warming and freshening of Antarctic Bottom Water // Journal of Climate. 2013. Vol 26. № 16. Pp. 6105–6122.
7. Polyakov I. V., Pnushkov A., Alkire M.B., et al. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Science. 2017. Vol 356, Pp. 285–291.

8. Ogorodov S.A., Shabanova N.N., Kessel A.S., Baranskaya A.V., Razumov S.O. Changes of hydrometeorological potential of thermoabrasion on the russian arctic coasts// Moscow University Bulletin. Series 5. Geography. 2022. №1. Pp. 26–42.
9. Ivanov V.V., Danshina A.V., Smirnov A.V. Spatiotemporal Structure and Variability of Thermohaline Parameters in the Intermediate Water Layer North of the Severnaya Zemlya Archipelago // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2025. Vol 18. № 2. Pp.19–40.
10. Danshina A.V. Spatial and temporal variations of Atlantic water layer parameters in the Nansen Basin // Proceedings of VIII all-russian scientific conference the seas of Russia: modern research methods and their practical applications. 2024. Pp. 142–143.
11. Erokhin V. Effects of Climate Change on the Opening of Maritime Transport Routes in the Arctic Ocean// Marketing and Logistics.2018. №5 (19). Pp. 32–45.
12. AARI WDC Sea-Ice [Electronic resource]]. URL: http://wdc.aari.ru (date of access 01.08.2026).
13. Torrence C., Compo G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 2018. Vol 79. №1. Pp. 61–78.
14. Grinsted A., Moore J. C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Processes in Geophysics. 2004. Vol 11. P. 561–566.
15. Box G. E. Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time series analysis: forecasting and control. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2015. 712 P.
16. Turner J., Phillips T., Hosking S., Marshall G.J., The Amundsen Sea Low // International Journal of Climatology. 2013. Vol 33. № 7. Pp. 1818–1829.
17. Yuan X., Martinson D. G. Antarctic Antarctic Dipole: A teleconnection in polar climate // Journal of Climate. 2001. Vol 14. № 11. Pp. 2464–2475.
18. Marshall G. J. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses // Journal of Climate. 2003. Vol 16. № 24. Pp. 4134–4143.
19. Thompson D. W., Solomon S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change // Science. 2002. Vol 296. Pp. 895–899.