

УДК 551.465

© В. А. Горчаков¹, А. Ю. Дворников¹, С. М. Гордеева^{1,2}, В. А. Рябченко¹, Д. В. Сеин^{1,3}, 2024

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, Москва

²Российский государственный гидрометеорологический университет, 192007, Воронежская ул., д. 79, Санкт-Петербург

³Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований имени Гельмгольца,

27570, Бремерхафен, Ам Ханделсхафен 12., Германия

*vikfioran@yandex.ru

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Статья поступила в редакцию 15.09.2023, после доработки 09.12.2023, принята в печать 02.02.2024

Аннотация

На основе решения модели МРІОМ (Max Planck Institute Ocean Model), представляющей собой модель океана со свободной поверхностью, основанную на примитивных уравнениях в приближениях Буссинеска и несжимаемости, за период 1949–2007 гг. исследуются межгодовые колебания температуры поверхности Северного Ледовитого океана и Северной Атлантики с южной границей на широте 55,25°с.ш. Спектры высокого разрешения оценивались методом быстрого преобразования Фурье с максимальным разрешением (метод Велча). Для «сжатия» большого объема исходной информации полей среднемесячных значений температуры поверхности моря используется метод факторного анализа, позволяющий выделить районы с высоко коррелированными колебаниями и свести исследование рассматриваемых характеристик к их анализу в локальных точках. Анализ главных факторов позволил выявить 10 районов с квазисинхронной изменчивостью аномалий температуры путем отнесения к ним точек, имеющих превышающую 0,6 корреляцию с соответствующими факторами. Классификация по соответствию спектральной структуры показала, что районы Чукотское море, Гудзонов залив, моря Ирмингера и Лабрадор имеют совпадения в пиках на периодах колебаний 5–6 лет и 8–9 лет. Схожую спектральную структуру, определяемую пиками на периодах 6 и 11 лет, имеют районы центральной и западной части Норвежского моря, влияния Северо-Атлантического течения, восточная часть Норвежского моря и участки Карского моря. Особняком выделяются Баффинов залив, имеющий два основных пика — на периодах 16 и 5–6 лет, и центральная и западная часть Баренцева моря, где колебания на малых периодах совпадают с колебаниями в Чукотском море, а на периодах 7–8 лет — с колебаниями в юго-восточной части Баренцева моря и восточной части Норвежского моря. В некоторых случаях пики спектров в разных районах проявляются со смещением и ослаблением, т. е. можно предположить, что при переносе температурного сигнала по акватории меняются и его частотные характеристики.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, моделирование, быстрое преобразование Фурье, метод Велча, колебания температуры, факторный анализ, кластерный анализ, спектральная структура

UDC 551.465

© V. A. Gorchakov¹, A. Y. Dvornikov¹, S. M. Gordeeva^{1,2}, V. A. Ryabchenko¹, D. V. Sein¹, 2024

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya Str., St. Petersburg, 192007, Russia

³Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, 27570, Am Handelshafen 12, Bremerhaven, Germany

*vikfioran@yandex.ru

SPATIAL STRUCTURE OF THE TEMPORARY VARIABILITY OF THE ARCTIC SEAS SURFACE TEMPERATURE

Received 15.09.2023, Revised 09.12.2023, Accepted 02.02.2024

Abstract

Interannual oscillations in the surface temperature of the Arctic Ocean and the North Atlantic with the southern boundary (instead “border”) at latitude 55°25' N between 1949 and 2007 are investigated based on the МРІОМ (Max Planck Institute Ocean Model) solution. It is a free surface ocean model based on primitive equations in the Boussinesq and incompressibility approximations. High-resolution

Ссылка для цитирования: Горчаков В.А., Дворников А.Ю., Гордеева С.М., Рябченко В.А., Сеин Д.В. Пространственная структура временной изменчивости температуры поверхности арктических морей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 1. С. 39–51. doi:10.59887/2073–6673.2024.17(1)–3

For citation: Gorchakov V.A., Dvornikov A.Y., Gordeeva S.M., Ryabchenko V.A., Sein D.V. Spatial Structure of the Temporary Variability of the Arctic Seas Surface Temperature. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 1, 39–51. doi:10.59887/2073–6673.2024.17(1)–3

spectra were estimated via fast Fourier transform with a maximum resolution (Welch's method). Factor analysis method, which makes it possible to identify areas with highly correlated oscillations and reduce the study of the characteristics in question to their analysis in local points, is used to minimize the significant amount of the initial information about monthly average sea surface temperature fields. Analysis of the main factors made it possible to identify 10 areas with quasi-synchronous variability of temperature anomalies by including the points correlated with relevant factors with correlation exceeding 0.6. Spectral structure compliance classification revealed that the areas of the Chukchi Sea, the Hudson Bay, the Irminger Sea, and the Labrador Sea have oscillation peak similarities for the periods of 5–6 years and 8–9 years. Central and western areas of the Norwegian Sea, the area affected by the North Atlantic Current, the eastern part of the Norwegian Sea, and some areas of the Kara Sea have similar spectral structure defined by the peaks at the 11-year and 6-year periods. The Baffin Bay with two main peaks at the 16-year and 5–6-year periods, and the central and the western parts of the Barents Sea, where oscillations are similar to the ones in the Chukchi Sea at short periods, and to the ones in the south-eastern part of the Barents Sea and in the eastern part of the Norwegian Sea at 7–8-year periods, stand out significantly. In some cases, spectrum peaks in different areas appear shifted and attenuated, so presumably the frequency characteristics of the temperature signal change as it moves across the water area.

Keywords: Arctic Ocean, modeling, fast Fourier transform (FFT), Welch's method, temperature oscillation, factor analysis, cluster analysis, spectral structure

1. Введение

Межгодовая изменчивость климатических факторов в Северном Ледовитом океане (СЛО), таких как температура и площадь ледяного покрова, демонстрирует существенные различия в периодах колебаний, определяемых в разных районах. Так, согласно данным [1], результаты обработки данных наблюдений разреза «Кольский меридиан» (КМ) позволяют выделить межгодовые колебания с периодами 4–5, 8–10, 12–13 и 15–17 лет. В то же время в межгодовой изменчивости температуры воды Баренцева моря, исследованной по данным ПИНРО в [2], были выделены периоды 6,2, 18,6 и 55,8 лет. В районе Северо-Европейского бассейна по данным [3] выделена периодичность в циркуляции атмосферы и океана порядка 7–8 лет, формирующаяся в результате взаимодействия атмосферы, океана и льдов в системе Северной Атлантики и (СЛО), а также слабые колебания климатических характеристик с периодами 2–3 года, 10–12 и 20 лет. В колебаниях температуры воды и приземного атмосферного давления в Северной Атлантике выявлено колебание с периодом 7,7 лет [4]. В изменчивости температуры воздуха на метеостанции Свалбард (Svalbard) Шпицбергена были выявлены циклы с периодами 2,5, 5,1, 8,7, 12,3, 36,7 лет [5]. Особенностью региона Баренцева и Карского морей является неравномерность изменения температуры воды и площади ледяного покрова. Так, в [6] показано, что площадь льда СЛО за период с 1978 по 2018 гг. имеет значительную межгодовую изменчивость, что определяется в первую очередь изменениями в заливе теплой атлантической воды из Северо-Европейского бассейна, которая также имеет значимый тренд, приводящий к потеплению воды и значительному сокращению ледового покрова [7]. Тем не менее, уменьшение адвекции теплых вод и, соответственно, понижение температуры воды в Баренцевом море отмечается, начиная с 2016 года [8]. В работе [9] в регионе Белого моря выделены колебания температуры на периодах близких к 3, 8 и 14 годам, связанные с Эль-Ниньо — глобальной атмосферной осцилляцией, Северо-Атлантическим колебанием и изменениями Северо-Атлантического течения, тогда как в регионе Баренцева моря выявлено квази-15-летнее колебание температуры, вызванное адвекцией тепла из Северной Атлантики [10].

Вышеперечисленные исследования, основанные на данных наблюдений, не в состоянии описать пространственно-временную структуру межгодовых колебаний Арктического бассейна в связи с небольшим числом и ограниченным доступом к данным о долговременных наблюдениях в локальных географических точках или разрезах.

В настоящее время предпринимаются попытки преодолеть указанный недостаток путем привлечения математических моделей циркуляции океана. Например, в работе [11] сезонные и межгодовые вариации адвективных потоков тепла в океане и атмосфере в регионе Баренцева моря за период 1993–2012 гг. исследовались на основе результатов региональной вихреразрешающей модели океана MIT и атмосферного реанализа ERA-Interim. Используемые авторами методы вейвлет-анализа и сингулярного спектрального анализа позволили выявить циклы с периодами 2–4 и 5–8 лет, хорошо согласующиеся с результатами наблюдений. В работе [12] математические методы, напротив, применяются для исследования причин и механизмов, регулирующих интенсивность и продолжительность выявленных эмпирически Арктических циркуляционных режимов, и объяснения хорошо выраженных декадных изменений в регионе в период 1948–1996 гг. и очевидного прекращения квазидекадного цикла циркуляционных режимов после 1996 г. В работе [13] на основе использования двух моделей разного разрешения (глобальной, использующей модельный комплекс ROM (Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model) [14]

и региональной, построенной на основе общей модели циркуляции Массачусетского Технологического Института (MITgcm — Massachusetts Institute of Technology general circulation model) [15]) получено решение, позволившее выделить диапазоны 3-х основных несущих частот колебаний, соответствующих периодам 1,0–3,6, 3,9–5,8 и 6,3–10,5 лет.

Таким образом очевидно, что в различных регионах СЛО климатические факторы испытывают сильную изменчивость, вызванную тем, что они определяются как глобальными, так и региональными механизмами со значительным количеством обратных связей, причем многие особенности взаимных связей остаются недостаточно изученными [16]. Однако влияние обратных связей и их интенсивность могут быть исследованы путем анализа временных рядов данных, характеризующих климатические колебания в СЛО.

Цель настоящей работы — выявление основных межгодовых колебаний температуры воды, а также оценка ее пространственной структуры в СЛО и Северной Атлантике до южной границы бассейна, расположенной на широте 55,25° с.ш., на основе среднемесячных данных о температуре воды. Данные получены в результате расчета по региональной модели Земной системы ROM (Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model) [14]. Для анализа долгопериодных колебаний в СЛО использованы осредняемые моделью среднемесячные значения, интерполированные на равномерную сетку с шагом 0,5° по широте и долготе. Спектры высокого разрешения оценивались методом быстрого преобразования Фурье с максимальным разрешением, которое увеличивает спектральное разрешение и, таким образом, позволяет точнее находить пики спектральной плотности на периодах, не кратных общей длине исходной записи.

2. Методы и подходы

2.1. Описание используемых моделей и методов

В основу анализа положены среднемесячные данные о температуре воды, полученные в результате расчета по региональной модели Земной системы ROM (Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model) [14]. Океаническим компонентом ROM является совместная (океан — морской лед) модель MPIOM (Max Planck Institute Ocean Model) [17]. MPIOM представляет собой модель океана со свободной поверхностью, основанную на примитивных уравнениях в приближениях Буссинеска и несжимаемости. Модель реализована на ортогональной криволинейной C-сетке [18]. Сетка океанской модели MPIOM покрывает весь Мировой океан и имеет высокое разрешение в Северной Атлантике и на шельфе Северной Европы. Горизонтальное разрешение постепенно изменяется от минимума, 5 км в Северном море, до максимума — 220 км в Антарктике. По вертикали сетка MPIOM имеет 30 z-уровней. В качестве граничных условий на поверхности используются атмосферные данные реанализа NCEP/NCAR [19] за период 1949–2007 гг. В климатических z-координатных моделях, явно воспроизводящих приливную динамику, таких как MPIOM, верхний слой выбирается с учетом максимально возможной высоты прилива. Таким образом, толщина верхнего слоя в данном эксперименте составляла 16 м, а глубина, к которой привязывается температура поверхности моря (ТПМ) — 8 м. Другими словами, модельная ТПМ — это температура верхнего 16-метрового слоя модели. Именно эта температура используется для сравнения с данными наблюдений на поверхности моря. Поэтому за ТПМ повсюду, включая районы, покрытые льдом, принимается температура воды в указанном верхнем слое.

Приливное воздействие на океан в модели получено из полного эфемеридного лунно-солнечного приливного потенциала [20]. Подробнее о настройках модели, а также о сравнении результатов расчета с данными наблюдений изложено в [14, 21].

Для анализа долгопериодных колебаний СЛО используются усредняемые моделью среднемесячные значения, интерполированные на равномерную сетку с шагом 0,5° по широте и долготе. При этом южная граница исследуемой области располагается на широте 55,25° с.ш. Таким образом, исходные данные представляют собой матрицы 80 × 720 значений, с 55,25° с.ш. по 89,75° с.ш. и с 179,75° з.д. по 179,75° в.д., в 708 точках временного ряда с января 1949 по декабрь 2007 года.

Спектры высокого разрешения оценивались методом быстрого преобразования Фурье с максимальным разрешением. Идея такого подхода состоит в следующем. Каждая запись наблюдений любой гидрологической величины, даже непрерывно изменяющейся во времени, имеет конечную длину и конечное временное разрешение. Запись не может быть представлена интегралом Фурье $S(f)$, в котором f является непрерывно изменяющейся частотой, а только конечным рядом коэффициентов Фурье $S(f)$, где f — из дискретной последовательности частот, соответствующих гармоникам, кратным общей длине записи. В результате амплитуда гармоник Фурье, не кратных общей длине записи, может быть недооценена, если

эта амплитуда значительно отличается от амплитуд ближайших гармоник. Для устранения этого эффекта можно воспользоваться методом Велча (МВ), предложенным в [22]. Метод заключается в многократном вычислении периодограмм, которые остаются после последовательного сокращения начальной записи. В дальнейшем, все такие периодограммы совмещаются и, в случае совпадения периодов, усредняются. Это увеличивает спектральное разрешение и, таким образом, позволяет точнее находить пики спектральной плотности на периодах, не кратных общей длине исходной записи.

Спектры с максимальным разрешением строятся путем последовательного сокращения длины временного ряда до половины от его первоначальной длины, поскольку при этом получаются наиболее непрерывные оценки спектральной плотности для всех частот. Спектры оцениваются сначала для ряда длины N : (1,..., N); затем для 2-х рядов длины $N-1$: (1,..., $N-1$) и (2,..., N); затем для 3-х рядов длины $N-2$: (1,..., $N-2$), (2,..., $N-1$) и (3,..., N) и т.д. до $N/2$ рядов длины $N/2$: (1,..., $N/2$), (2,..., $N/2+1$), ..., ($N/2$,..., N). Затем все полученные спектры объединяются в один путем упорядочивания по частотам и усреднения при совпадении частот [23].

Используя этот метод, спектры мощности оцениваются не только для общей длины записи, но также и для постепенно сокращенных временных рядов с последующим совмещением всех полученных периодограмм.

2.2. Выбор репрезентативных точек

Исследование временной изменчивости гидрологических характеристик на пространстве всего СЛО требует обработки большого количества информации. Для «сжатия» этой информации в работе используется такой метод многомерной статистики, как факторный анализ [24]. Он позволяет выделить районы с высоко коррелированными колебаниями и свести исследование рассматриваемых характеристик к их анализу в локальных точках, отражающих эти районы. Метод был применен для полей среднемесячных значений ТПМ, полученных по модели ROM.

Из каждой точки поля ТПМ был удалена сезонная изменчивость путем вычитания среднего многолетнего годового хода. Полученные аномалии ТПМ (АТПМ) оценивались по величине стандартного отклонения (СКО). Точки с СКО меньше $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в центральной зоне СЛО) были исключены. Для оставшихся ежемесячных значений АТПМ за 59 лет (1949–2007 гг.) в 708-ми точках проведен анализ главных факторов. Сходимость разложения матрицы, представленная в табл. 1, для 10-ти первых факторов, демонстрирует их совокупную дисперсию равную 52,4 % дисперсии всей матрицы.

Перераспределение дисперсии путем второго поворота факторных осей позволило выявить районы с квазисинхронной изменчивостью ТПМ путем отнесения к ним точек, имеющих корреляцию с соответствующими факторами, превышающую 0,6. В результате бассейн был разделен на 10 районов (рис. 1),

Таблица 1

Table 1

Сходимость факторного разложения до второго поворота для ежемесячных АТПМ в 708-ми точках СЛО за период 1949–2007 гг.

Convergence of factor decomposition before the second rotation for monthly SSTA at 708 points of the Arctic Ocean for the period between 1949 and 2007

Номер фактора	Собственное число	Дисперсия, %	Накопленная дисперсия, %
1	150,9	21,3	21,3
2	54,7	7,7	29,0
3	35,1	5,0	33,9
4	28,7	4,1	38,0
5	21,9	3,1	41,1
6	21,4	3,0	44,1
7	16,4	2,3	46,4
8	14,8	2,1	48,5
9	14,4	2,0	50,5
10	13,3	1,9	52,4

АТПМ в которых можно считать высоко коррелированными между собой. Точки в центральной и восточной частях СЛО имеют СКО АТПМ меньше $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ из-за наличия морского льда, поэтому эти участки были удалены из анализа. Напоминаем, что выбранные 10 районов представляют лишь 52 % общей дисперсии АТПМ и характеризуют крупномасштабные поля и колебания. Точки, которые не вошли ни в один из районов отражают остальные 48 % (2294 фактора) — более мелкие и более локальные колебания, и нами не рассматривались.

Как видно на рис. 1, районы практически совпадают с географическими особенностями акваторий (табл. 2).

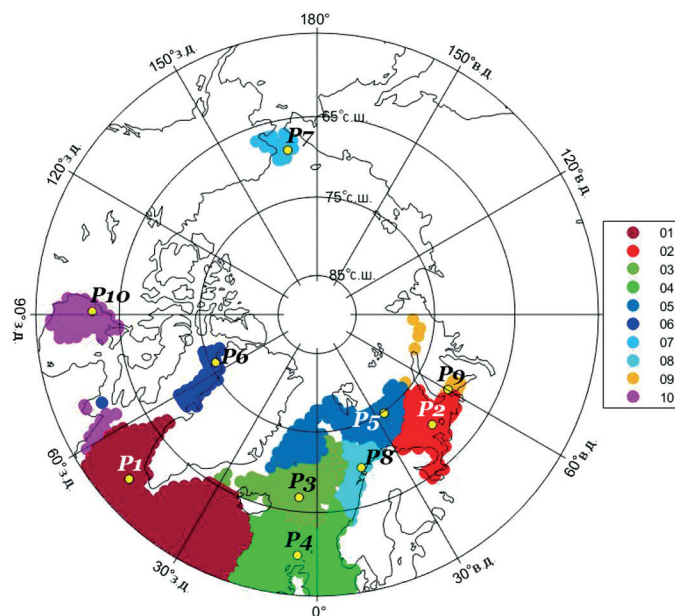


Рис. 1. Результаты факторного анализа: районы 1–10 с квази-синхронной межгодовой изменчивостью ТПМ за период 1949–2007 гг. по модели ROM. Положение места исследования в каждом районе (P1–P10) показано желтыми точками

Fig. 1. Factor analysis results: areas 1–10 with quasi-synchronous inter-annual SST variability for the period between 1949 and 2007 according to the ROM model. The positions of the points under study (P1–P10) are indicated with yellow dots

Таблица 2

Table 2

Соответствие выделенных районов географическим особенностям акваторий

Accordance of the selected areas to their geographical features

Номер района	Географическая привязка	Аббревиатура на англ.яз.
1	Моря Ирмингера и Лабрадор	IL
2	Юго-восточная часть Баренцева моря	SEB
3	Центральная и западная часть Норвежского моря	WNS
4	Район влияния Северо-Атлантического течения $55\text{--}65^{\circ}$ с.ш.	NA
5	Центральная и западная часть Баренцева моря	CWB
6	Баффинов залив	BB
7	Чукотское море	ChS
8	Восточная часть Норвежского моря	ENS
9	Участки Карского моря	KS
10	Гудзонов залив	HB

3. Результаты

3.1. Колебания температуры воды на станциях разреза «Кольский меридиан»

Как было показано в работе [13], в точках разреза «Кольский меридиан» амплитуды сезонных и межгодовых колебаний являются величинами одного порядка. Таким образом вклад межгодовых колебаний температуры в общую картину колебаний оказывается существенным.

Первоначальное сравнение результатов проводилось на основе данных разреза «Кольский меридиан» (КМ) [25]. Доступные данные на станциях разреза «Кольский меридиан» ($33,5^\circ$ в.д.) были усреднены по пространству для станций 3–7, точка К3–7 отнесена к станции 5 ($71,5^\circ$ с.ш.). Были произведены расчеты как на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ), так и МВ. Прежде чем перейти к анализу результатов отметим, во-первых, что расчет на основе МВ дает излишне большое количество небольших пиков, затрудняющих рассмотрение. Для устранения этой особенности решения и сглаживания полученного спектра к нему применен фильтр Хемминга с окном 31 [26]. Во-вторых, поскольку длина исходных рядов не превышает 59 лет, имеет смысл рассматривать только межгодовые колебания с периодами в диапазоне не более 20 лет. Результаты расчета на основе БПФ и МВ с последующей фильтрацией по Хеммингу представлены на рис. 2.

Существующие результаты обработки данных наблюдений разреза КМ, представленные, например, в работе [1], выделяют в межгодовых колебаниях периоды 4–5, 8–10, 12–13 и 15–17 лет. В спектрограммах, полученных на основе обработки более длинных рядов данных того же разреза (рис. 2), выделяются колебания в диапазоне 2–3, 4–5, 6,5–7,5 и 12 лет. Колебания на периодах 8–10 лет в нашем расчете не выделяются. Более того, сравнение результатов, полученных разными методами, демонстрирует, что БПФ дает картину спектра с меньшим числом пиков, по сравнению со спектрограммой, полученной по МВ. Так, в спектрограмме БПФ совершенно отсутствует пик на периоде 12 лет, а большинство пиков БПФ, совпадающих в обоих расчетах, несколько смещены в сторону больших периодов. Более подробный анализ спектров на частотах 1–2 года в целом подтверждает общую закономерность, выявленную для спектрограмм БПФ и МВ, а также демонстрирует несколько лучшее воспроизведение Чандлеровских колебаний с периодом в 14 месяцев.

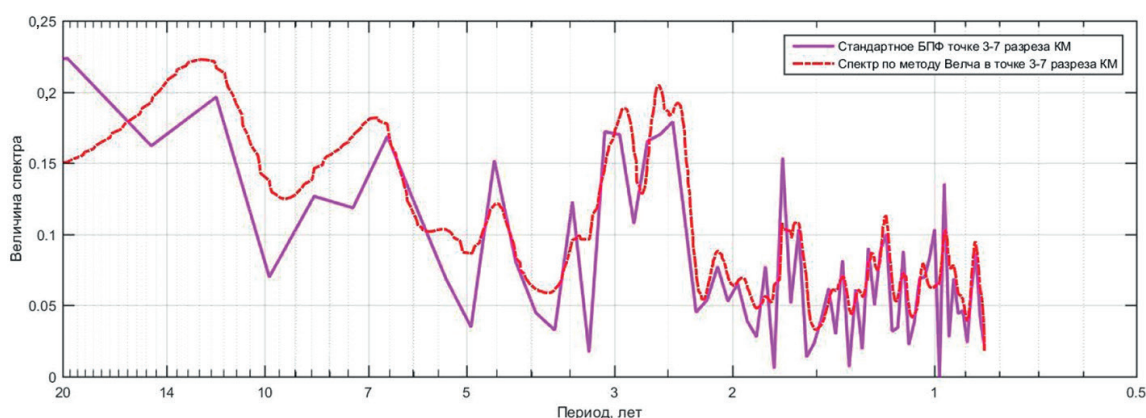


Рис. 2. Спектры колебаний аномалий температуры на станции К3–7 разреза «Кольский меридиан», полученные с помощью быстрого преобразования Фурье (фиолетовая линия) и по методу Велча (красный пунктир) на периодах 0,5–20 лет

Fig. 2. Oscillation spectra of temperature anomalies on the K3–7 station of the «Kola» section, obtained via fast Fourier transform (the violet line) and Welch's method (the red dotted line) for 0.5–20-year-periods

Таким образом, можно утверждать, что спектрограммы, рассчитанные с использованием МВ дают более подробную и лучшую картину, чем рассчитанные с помощью стандартного БПФ.

3.2. Анализ колебаний в различных районах акватории

Как показано в разделе 2.2, на рассматриваемой акватории можно выделить 10 районов с квазисинхронной изменчивостью ТПМ. Спектральный анализ временных рядов АТПМ по методу Велча выпол-

нялся в одной точке каждого района, имевшей максимальное значение корреляции с соответствующим фактором (точки показаны звездочками на рис. 1). Спектры, рассчитанные для всех десяти районов, совмещенные на одном графике, представлены на рис. 3.

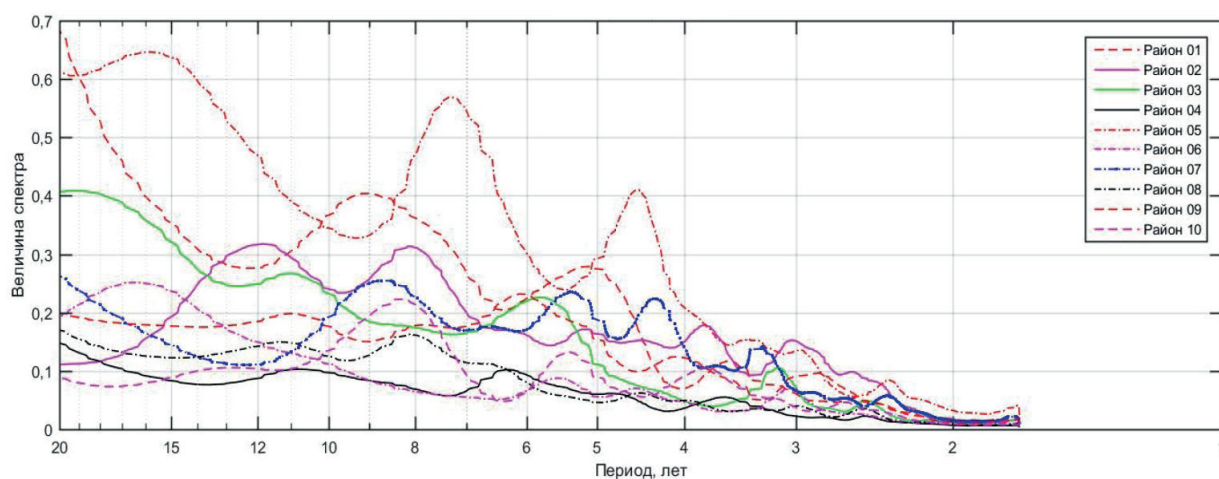


Рис. 3. Спектры колебаний аномалий температуры, полученные по методу Велча, на периоде 1–20 лет в каждом из 10-ти выделенных районов

Fig. 3. Oscillation spectrum of temperature anomalies, obtained via Welch's method in the 1–20-year-period in each of 10 areas

Как видно, выделить колебания с периодами, общими для всех районов, достаточно сложно. Поэтому для обобщения картины по пикам спектров выявлены колебания в разных интервалах периодов, представленные в табл. 3. Как видно из таблицы, наиболее «шумными», с наибольшим количеством спектральных составляющих являются районы 2, 5 и 7 (юго-восточная часть Баренцева моря, центральная и западная часть Баренцева моря, Чукотское море, соответственно). Это можно объяснить тем, что Баренцево и Чукотское моря, находясь на шельфе, в значительной мере подвержены трансформации вод, особенно в поверхностном слое. В частотной структуре во всей арктической зоне преобладают периоды колебаний 5–6, 3–3,3 и 8–9 лет.

Для выявления групп районов, имеющих колебания близких периодов, по таблице соответствия (табл. 3) был выполнен кластерный анализ с метрикой Хемминга. Результаты анализа представлены на рис. 4.

Таблица 3

Table 3

Наличие пиков на заданных интервалах периодов

Peaks in the given period intervals

Номер района	Периоды, лет										Сумма случаев
	16	12	11	8–9	7	5–6	4–5	3–4	3–3,3	2,3	
1 IL	–	–	–	+	–	+	–	+	–	–	3
2 SEB	–	+	–	+	–	+	–	+	+	–	5
3 WNS	–	–	+	–	–	+	–	–	+	–	3
4 NA	–	–	+	–	–	–	–	+	–	–	2
5 CWB	+	–	–	–	+	–	+	–	+	+	5
6 BB	+	–	–	–	–	+	–	–	–	–	2
7 ChS	–	–	–	+	–	+	+	–	+	+	5
8 ENS	–	–	+	+	–	–	–	–	–	–	2
9 KS	–	–	+	–	–	+	+	–	+	–	4
10 HB	–	–	–	+	–	+	–	+	+	–	4
Сумма случаев	2	1	4	5	1	7	3	4	6	2	

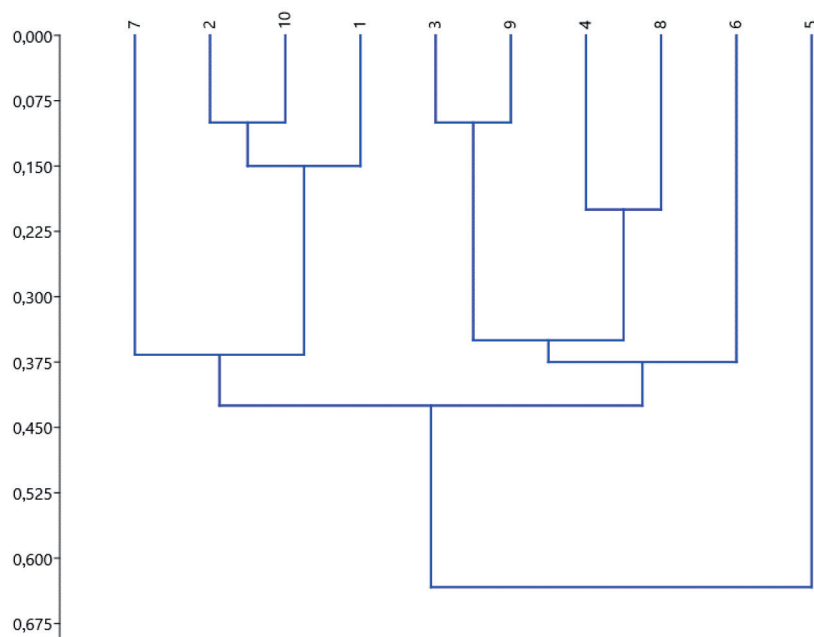


Рис. 4. Дендрограмма классификации по соответствию спектральной структуры для районов ТПМ за период 1949–2007 гг. по модели ROM. Вертикальная ось — вероятность несоответствия

Fig. 4. Dendrogram of the spectral structure compliance classification for the SST areas for the period 1949–2007 according to the ROM model. The vertical axis shows the probability of non-compliance

Классификация по соответствию спектральной структуры показала, что похожи между собой районы 7, 10, 1 и 2 (Чукотское море, Гудзонов залив, моря Ирмингера и Лабрадор, юго-восточная часть Баренцева моря), прежде всего, по совпадению колебаний периодов 8–9 лет и 5–6 лет (рис. 5, а). Схожую спектральную структуру, определяемую периодами 11 и 6 лет, имеют районы 3, 4, 8, 9 (центральная и западная части Норвежского моря, район влияния Северо-Атлантического течения 55–65° с. ш., Восточная часть Норвежского моря, участки Карского моря) (рис. 5, б). Если первая группа районов характеризуется холодными поверхностными водами и их трансформацией, связанной с дальнейшим охлаждением и взаимодействием с ледовым покровом, то вторая группа районов, очевидно, связана с атлантическими водами, поступающими в СЛО с юга.

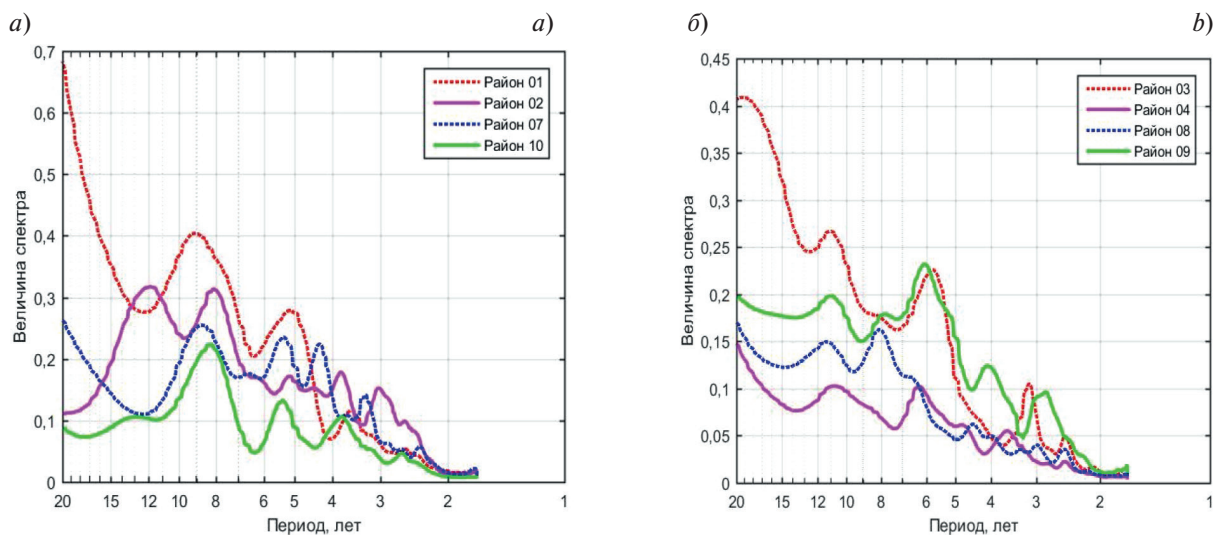


Рис. 5. Окончание рис. на стр. 47

Fig 5. Fin p. 47

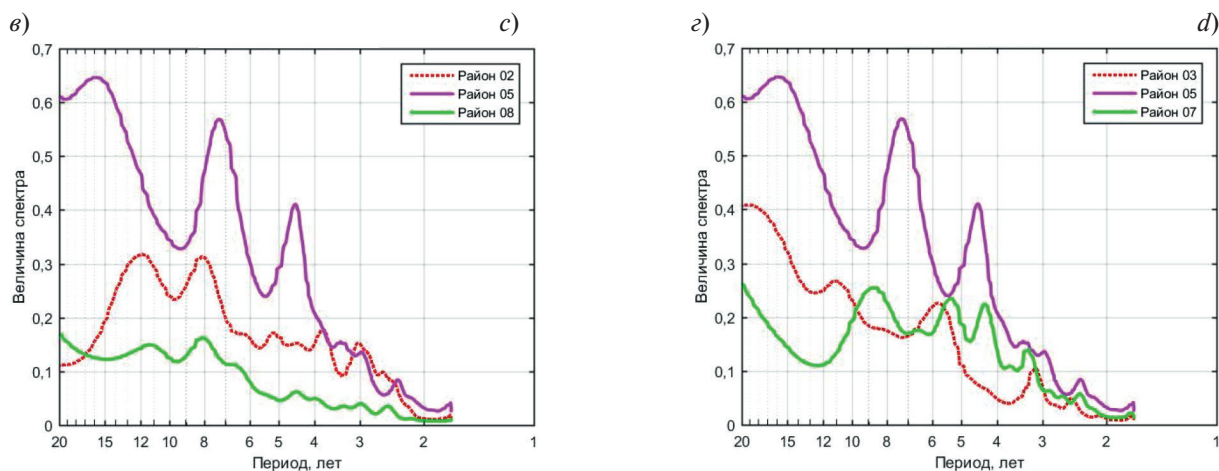


Рис. 5. Спектры колебаний аномалий температуры, полученные по методу Велча на периодах 1–20 лет в районах 1 (моря Ирмингера и Лабрадор), 2 (ЮВ Баренцева моря), 7 (Чукотское море) и 10 (Гудзонов залив) (а); районах 3 (Ц и 3 Норвежского моря), 4 (р-н влияния СА течения), 8 (Вост. Норвежского моря) и 9 (Карское море) (б); районах 2 (ЮВ Баренцева моря), 5 (Ц и 3 Баренцева моря) и 8 (Вост. Норвежского моря) (в); и районах 3 (Ц и 3 Норвежского моря), 5 (Ц и 3 Баренцева моря) и 7 (Чукотское море) (г)

Fig. 5. Oscillation spectra of temperature anomalies, obtained via Welch's method in 1–20-year periods for areas 1 (the Irminger Sea and the Labrador Sea), 2 (south-east of the Barents Sea), 7 (the Chukchi Sea), and 10 (the Hudson Bay) (a); areas 3 (central and western parts of the Norwegian Sea), 4 (the area affected by the North Atlantic Current), 8 (the eastern part of the Norwegian Sea), and 9 (The Kara Sea) (b); areas 2 (south-east of the Barents Sea), 5 (central and western parts of the Barents Sea), and 8 (the eastern part of the Norwegian Sea) (c); areas 3 (central and western parts of the Norwegian Sea), 5 (central and western parts of the Barents Sea), and 7 (the Chukchi Sea) (d)

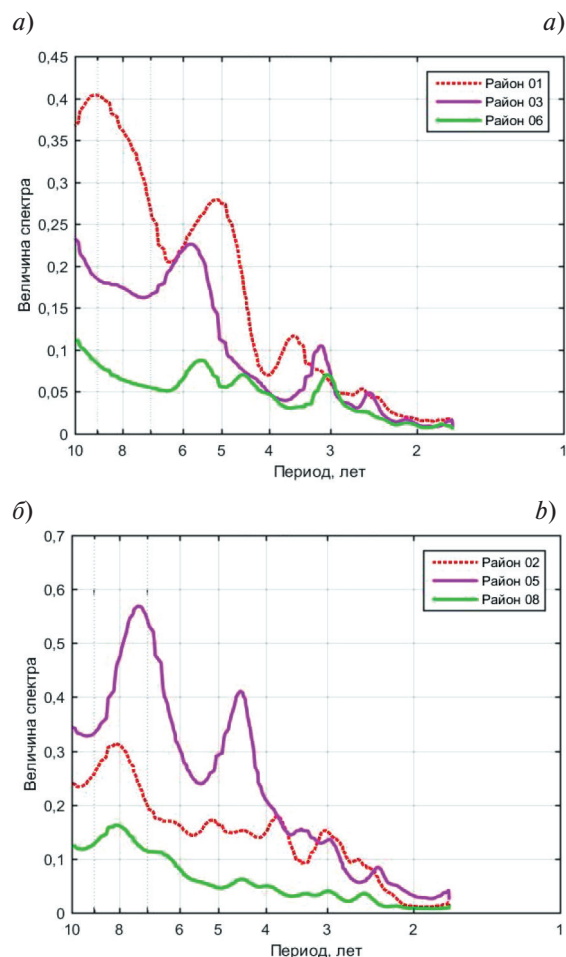
Особняком выделяется район Баффинова залива (район 6), который имеет два основных пика — на длинном периоде 16 лет и на общем для СЛО 5–6-летнем периоде.

Район 5 (центральная и западная часть Баренцева моря) также выделяется из всей совокупности. На малых периодах (2,3, 3,3, 4,5 лет) колебания ТПМ там практически совпадают с колебаниями в районе Чукотского моря (район 7) (рис. 5, в), а на периодах 7–8 лет — с колебаниями в районах 2 и 8 (юго-восточная часть Баренцева моря, восточная часть Норвежского моря) (рис. 5, г). Особенностью данного района является наличие максимально подвижной ледовой границы, отсутствующей в других районах. Поэтому спектральная структура этой акватории отличается от районов, не имеющих данной особенности.

Однако также можно увидеть, что в некоторых случаях пики спектров проявляются со смещением и ослаблением (рис. 6).

Рис. 6. Спектры колебаний аномалий температуры, полученные по методу Велча, на периодах 1–10 лет в районах 1 (моря Ирмингера и Лабрадор), 3 (Ц и 3 Норвежского моря) и 6 (Баффинов залив) (а), и районах 2 (ЮВ Баренцева моря), 5 (Ц и 3 Баренцева моря) и 8 (Вост. Норвежского моря) (б)

Fig. 6. Oscillation spectra of temperature anomalies, obtained via Welch's method in 1–10-year periods for areas 1 (the Irminger Sea and the Labrador Sea), 3 (central and western parts of the Norwegian Sea), 6 (The Baffin Bay) (a), and areas 2 (the south-eastern part of the Barents Sea), 5 (central and western parts of the Barents Sea), and 8 (the western part of the Norwegian Sea) (b)



Например, первоначальное относительно долгопериодное колебание (с периодом 3,5 лет) в море Ирмингера и Лабрадор (район 1) в Норвежском море (район 3) видно более коротким с периодом 3,2 года, а колебание с первоначальным периодом 2,6 лет — периодом 2,5 года. В море Баффина (район 6) первое колебание видно еще более коротким — с периодом 3 года (рис. 6, а). Другое колебание в центральной и западной части Баренцева моря (район 5) с периодом 7,2 года, в юго-восточной части Баренцева моря (район 2) удлиняется до периода 7,9 лет, а в восточной части Норвежского моря оно уже отмечается с периодом 8,1 лет (район 8) (рис. 6, б). Таким образом, можно выдвинуть гипотезу, что при переносе температурного сигнала по акватории меняются и его частотные характеристики. Однако эта гипотеза требует дополнительного исследования.

4. Выводы

1. Сравнение результатов, получаемых на основе стандартного быстрого преобразования Фурье (БПФ) и метода Велча (МВ), проведенное на основе данных разреза «Кольский меридиан», демонстрирует, что БПФ дает картину спектра с меньшим числом пиков по сравнению со спектрограммой, полученной по МВ. Так, в спектрограмме БПФ совершенно отсутствует пик на периоде 12 лет, а большинство пиков БПФ, совпадающих в обоих расчетах, несколько смещены в сторону больших периодов.

2. В рассматриваемой акватории можно выделить 10 районов с квазисинхронной изменчивостью ТПМ. Как оказалось, выделить колебания с периодами, общими для всех районов, достаточно сложно, однако можно выделить районы с совпадающими колебаниями различных периодов. Районами с наибольшим количеством спектральных составляющих являются районы 2, 5 и 7 (юго-восточная часть Баренцева моря, Центральная и западная часть Баренцева моря, Чукотское море). В частотной структуре во всей арктической зоне преобладают периоды колебаний 5–6, 3–3,3 и 8–9 лет.

3. Классификация по соответствию спектральной структуры показала, что похожи между собой районы 7, 10, 1, и 2 (Чукотское море, Гудзонов залив, моря Ирмингера и Лабрадор, юго-восточная часть Баренцева моря), прежде всего, по совпадению колебаний периодов 8–9 и 5–6 лет. Схожую спектральную структуру, определяемую периодами 11 и 6 лет, имеют районы 3, 4, 8, 9 (центральная и западная часть Норвежского моря, район влияния Северо-Атлантического течения 55–65° с.ш., восточная часть Норвежского моря, участки Карского моря).

4. Особо выделяются район Баффина залива (район 6), имеющий два основных пика — на периоде 16 лет и на общем для Арктического бассейна 5–6-летнем периоде и район центральной и западной части Баренцева моря (район 6), в котором на малых периодах (2,3, 3,3, 4,5 лет) колебания ТПМ практически совпадают с колебаниями в районе Чукотского моря (район 7), а на периодах 7–8 лет — с колебаниями в районах 2 и 8 (юго-восточная часть Баренцева моря, восточная часть Норвежского моря).

5. В некоторых случаях пики спектров проявляются со смещением и ослаблением. Тем самым можно выдвинуть гипотезу, что при переносе температурного сигнала по акватории меняются и его частотные характеристики. Однако эта гипотеза требует дополнительного исследования.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FMWE-2024-0028.

Funding

The work was carried out within the theme of the state assignments No FMWE-2024-0028.

Литература

1. Бочков Ю.А. Прогноз температуры воды в Баренцевом море на 1965–1970 годы // Материалы сессии ученого совета ПИНРО по результатам исследований в 1964 г. Вып. IV. С. 64–79.
2. Yndestad H., Turrell W.R., Ozhigin V. Lunar nodal tide effects on variability of sea level, temperature, and salinity in the Faroe-Shetland Channel and the Barents Sea // Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2008. Vol. 55, N 10. P. 1201–1217. doi:10.1016/j.dsr.2008.06.003
3. Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Дроздов В.В. Циклонический центр действия атмосферы и океана в Северной Атлантике // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 15. С. 117–134.
4. Da Costa E., De Verdiere C. The 7.7-year North Atlantic oscillation // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2002. Vol. 128, N 581. P. 797–817. doi:10.1256/0035900021643692

5. Humlum O., Solheim J.-E., Stordahl K. Spectral analysis of the svalbard temperature record 1912–2010 // *Advances in Meteorology*. 2011. Article ID175296. 14 p. doi:10.1155/2011/175296
6. Юлин А.В., Вязигина Н.А., Егорова Е.С. Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // *Российская Арктика*. 2019. № 7. С. 28–40. doi:10.24411/2658-4255-2019-10073
7. IPCC, 2014: 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC: Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
8. Jelmert A., Sandø A.B., Frie A.K. et al. Status for miljøet i Barentshavet. Rapport fra Overvåkingsgruppen 2020 // *Havforskningsinstituttet*. 2020. [электронный ресурс]. URL: <https://www.hi.no/hi/nettrapporter/rapport-fra-havforskningen-2020>—13 (дата обращения: 09.06.2020).
9. Серых И.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Костяная Е.А. О переходе температурного режима региона Белого моря в новое фазовое состояние // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 1. С. 98–111. doi:10.59887/fpg/k9x4-p8fz-5kz6
10. Серых И.В., Костяной А.Г. О климатических изменениях температуры Баренцева моря и их возможных причинах // *Система Баренцева моря / под ред. академика А.П. Лисицына*. М.: ГЕОС, 2021. 672 с.
11. Башмачников И.Л., Юрова А.Ю., Бобылев Л.П., Весман А.В. Сезонная и межгодовая изменчивость потоков тепла в районе Баренцева моря // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54, № 2. С. 239–249. doi:10.7868/S0003351518020149
12. Proshutinsky A., Dukhovskoy D., Timmermans M.L., Krishfield R., Bamber J.L. Arctic circulation regimes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. 373(2052). 20140160. doi:10.1098/rsta.2014.0160
13. Горчаков В.А., Дворников А.Ю., Гордеева С.М., Рябенко В.А. Пространственная изменчивость межгодовых колебаний температуры Баренцева и Карского морей по результатам моделирования // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 4. С. 50–65. doi:10.7868/S207366732004005X
14. Sein D.V., Mikolajewicz U., Groger M., Fast I., Cabos W., Pinto J.G., Hagemann S., Semmler T., Izquierdo A., Jacob D. Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM: 1. Description and validation // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2015. Vol. 7, N 1. P. 268–304. doi:10.1002/2014MS000357
15. Marshall J., Adcroft A., Hill C., Perelman L., Heisey C. A finite-volume, incompressible navier-stokes model for studies of the ocean on parallel computers // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1997. Vol. 102(C3). P. 5753–5766. doi:10.1029/96JC02775
16. Шерстюков Б.Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата // *Арктика и Север*. 2016. № 24. P. 39–67. doi:10.17238/issn2221-2698.2016.24.39
17. Marsland S.J., Haak H., Jungclaus J.H., Latif M., Roske F. The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates // *Ocean Modelling*. 2003. Vol. 5. P. 91–127. doi:10.1016/S1463-5003(02)00015-X
18. Arakawa A., Lamb V.R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model // *Methods in Computational Physics: Advances in Research and Applications*. 1977. Vol. 17. P. 173–265. doi:10.1016/B978-0-12-460817-7.50009-4
19. Kistler R. et al. The NCEP-NCAR50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2001. Vol. 82, N 2. P. 247–268. doi:10.1175/1520-0477(2001)082<0247: TNNYRM>2.3.CO;2
20. Thomas M., Sündermann J., Maier-Reimer E. Consideration of ocean tides in an OGCM and impacts on subseasonal to decadal polar motion excitation // *Geophysical Research Letters*. 2001. Vol. 28, N 12. P. 2457–2460. doi:10.1029/2000GL012234
21. Sein D.V., Gröger M., Cabos W. et al. Regionally coupled atmosphere-ocean-marine biogeochemistry model ROM: 2. Studying the climate change signal in the North Atlantic and Europe // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020. Vol. 12. e2019MS00164. doi:10.1029/2019MS001646
22. Welch P.D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967. AU-15 (2): 70–73.
23. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin // *Theoretical and Applied Climatology*. 2019. Vol. 137. N 3–4. P. 2639–2656. doi:10.1007/s00704-018-02761-0
24. Rummel R.J. Applied factor analysis: 1st edition. — Evanston, USA: Northwestern University Press, 1988. 617 p.
25. Карсаков А.Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900–2008 гг. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. 139 с.
26. Hamming R.W. The art of doing science and engineering: Learning to learn. Amsterdam, Netherlands, Gordon and Breach Science Publishers, 1997. 227 p.

References

1. Bochkov Yu.A. Forecast of water temperature in the Barents Sea for 1965–1970. *Proceeding of the PINRO Academic Council Session on the Results of Research in 1964*, release IV, 64–79 (in Russian).
2. Yndestad H., Turrell W.R., Ozhigin V. Lunar nodal tide effects on variability of sea level, temperature, and salinity in the Faroe-Shetland Channel and the Barents Sea. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2008, 55, 10, 1201–1217. doi:10.1016/j.dsr.2008.06.003
3. Smirnov N.P., Vorobyov V.N., Drozdov V.V. Cyclonic center of atmosphere and ocean action in North Atlantic. *Proceeding of RSHU*. 2010, 15, 117–134 (in Russian).
4. Da Costa E., De Verdiere C. The 7.7-year North Atlantic Oscillation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2002, 128, 797–817.
5. Humlum O., Solheim J.-E., Stordahl K. Spectral analysis of the Svalbard temperature record 1912–2010. *Advances in Meteorology*. 2011, Article ID175296, 14 p. doi:10.1155/2011/175296
6. Yulin A.V., Vyazgina N.A., E.S. Egorova E.S. Interannual and seasonal variability of Arctic Sea ice extent according to satellite observations. *Russian Arctic*. 2019, 7, 28–40. doi:10.24411/2658-4255-2019-10073
7. IPCC, 2014: 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 [CoreWriting Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC: Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
8. Jelmert A., Sandø A.B., Frie A.K. et al. Status for miljøet i Barentshavet. Rapport fra Overvåkingsgruppen 2020. *Havforskningsinstituttet*. 2020. Electronic resource. URL: <https://www.hi.no/hi/nettrapporter/rapport-fra-havforskningen-2020-13> (date of access: 09.06.2020).
9. Serykh I.V., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Kostianaya E.A. On the transition of temperature regime of the White Sea region to a new phase state. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 1, 98–111. doi:10.59887/fpg/k9x4-p8fz-5kz6
10. Serykh I.V., Kostianoy A.G. On climatic changes in the temperature of the Barents Sea and their possible causes. *The Barents Sea System* / edited by the Academician Lisitsin. M., GEOS, 2021. 672 p. (in Russian).
11. Bashmachnikov I.L., Yurova A.U., Bobylev L.P., Vesman A.V. Seasonal and interannual variations of the heat fluxes in the Barents Sea region. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018, 54, 2, 213–222. doi:10.1134/S0001433818020032
12. Proshutinsky A., Dukhovskoy D., Timmermans M.L., Krishfield R., Bamber J.L. Arctic circulation regimes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2052), 20140160. doi:10.1098/rsta.2014.0160
13. Gorchakov V.A., Dvornikov A.Y., Gordeeva S.M., Ryabchenko V.A. Spatial variability of interannual temperature oscillations in the Barents Sea and the Kara Sea according to simulation results. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020, 13, 4, 50–65. doi:10.7868/S207366732004005X (in Russian).
14. Sein D.V., Mikolajewicz U., Groger M., Fast I., Cabos W., Pinto J.G., Hagemann S., Semmler T., Izquierdo A., Jacob D. Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM: 1. Description and validation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2015, 7, 268–304. doi:10.1002/2014MS000357
15. Marshall J., Adcroft A., Hill C., Perelman L., Heisey C. A finite-volume, incompressible navier-stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1997, 102(C3), 5753–5766.
16. Sherstyukov B.G. Climatic conditions of the Arctic and new approaches to forecasting climate change. *Arctic and North*. 2016, 24, 39–67.
17. Marsland S. J., Haak H., Jungclaus J.H., Latif M., Roske F. The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean Modelling*. 2003, 5, 91–127. doi:10.1016/S1463-5003(02)00015-X
18. Arakawa A., Lamb V.R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model, Methods. *Methods in Computational Physics: Advances in Research and Applications*. 1977, 17, 173–265. doi:10.1016/B978-0-12-460817-7.50009-4
19. Kistler R. et al. The NCEP/NCAR50 year reanalysis: Monthly-means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2001, 82, 247–267.
20. Thomas M., Sündermann J., Maier-Reimer E. Consideration of ocean tides in an OGCM and impacts on subseasonal to decadal polar motion excitation. *Geophysical Research Letters*. 2001, 28, 2457–2460. doi:10.1029/2000GL012234
21. Sein D.V., Gröger M., Cabos W. et al. Regionally coupled atmosphere-ocean-marine biogeochemistry model ROM: 2. Studying the climate change signal in the North Atlantic and Europe. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020, 12, e2019MS00164. doi:10.1029/2019MS001646
22. Welch P.D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1967. AU-15 (2): 70–73.
23. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin. *Theoretical and Applied Climatology*. 2019, 137, 3–4, 2639–2656. doi:10.1007/s00704-018-02761-0

24. *Rummel R.J.* Applied factor analysis: 1st edition. *Evanston, USA, Northwestern University Press*, 1988. 617 p.
25. *Karsakov A.L.* Oceanographic studies at the Kola Meridian Section in the Barents Sea for the period 1900–2008. *Murmansk, PINRO Publishing*, 2009. 139 p. (in Russian).
26. *Hamming R.W.* The art of doing science and engineering: Learning to learn. *Amsterdam, Netherlands, Gordon and Breach Science Publishers*, 1997. 227 p.

Об авторах

- ГОРЧАКОВ Виктор Анатольевич, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, ORCID ID: 0009-0003-3270-4539, Scopus AuthorID: 36892327800, AuthorID: 70653, e-mail: vikfioran@yandex.ru
- ДВОРНИКОВ Антон Юрьевич, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, ORCID ID: 0000-0002-9334-3138, WoS ResearcherID: B-5971–2017, Scopus AuthorID: 7006072591, SPIN-код: 6863-5988, e-mail: anton.dvornikoff@gmail.com
- ГОРДЕЕВА Светлана Михайловна, старший научный сотрудник, доцент, кандидат географических наук, ORCID ID: 0000-0001-9797-5266, WoS ResearcherID: H-5890–2013, Scopus AuthorID: 6506898803, SPIN-код: 7836-2105, e-mail: smgordeeva@yandex.ru
- РЯБЧЕНКО Владимир Алексеевич, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, ORCID ID: 0000-0003-3909-537X, WoS ResearcherID: R-3877–2016, Scopus AuthorID: 7005479766, SPIN-код: 2187-1380, e-mail: vla-ryabchenko@yandex.ru
- СЕИН Дмитрий Владимирович, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, ORCID ID: 0000-0002-1190-3622, WoS ResearcherID: P-6419–2018, Scopus AuthorID: 6507684871, SPIN-код: 9518-7196, e-mail: dmitry.sein@awi.de