

УДК 551.465

© В. А. Горчаков^{1*}, А. Ю. Дворников¹, С. М. Гордеева^{1,2}, В. А. Рябченко¹

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

²Российский государственный гидрометеорологический университет, 195196, Малоохтинский пр., д.98., г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: vikfioran@yandex.ru

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МЕЖГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Статья поступила в редакцию 19.06.2020, после доработки 11.09.2020

Исследуются межгодовые колебания температуры Баренцева и Карского морей в интервале от 1 до 12 лет, воспроизведенные на основе исключительно модельных решений без привлечения данных реанализа в распределениях температуры воды. В основу анализа положены модельные решения с 1975 по 2005 гг. Решения получены на основе двух моделей разного разрешения. Установлено, что модели корректно воспроизводят климат в исследуемом районе. Амплитуды межгодовых колебаний температуры воды в исследуемом районе имеют величины сравнимые с амплитудой сезонных колебаний. Для выявления периодичности и возможной нестационарности по частоте используется метод вейвлет-анализа, позволяющий исследовать циклические компоненты вне зависимости от того, как меняется их частота. Результаты анализа демонстрируют, что колебания температуры атмосферы, верхних слоев океана и площади ледяного покрова имеют схожие периоды, причем некоторые известные колебания в системе океан-атмосфера укладываются в интервалы колебаний, найденных в модельных решениях. В распределении колебаний температуры атмосферы и температуры воды исходных рядов отчетливо прослеживается связь размахов колебаний с положением кромки ледового покрова. В колебаниях температуры воды и воздуха в локальных точках выделены диапазоны 3-х основных несущих частот колебаний рассматриваемых характеристик, соответствующие периодам 1.0–3.6 года, 3.9–5.8 и 6.3–10.5 лет, хорошо согласующиеся с диапазонами периодов основных несущих колебаний на станциях разреза «Кольский меридиан». Периоды колебаний площади ледового покрова полностью содержатся в указанных диапазонах 3-х основных колебаний температуры воды и воздуха в рассматриваемых локальных точках Баренцева и Карского морей. Интенсивность колебаний температуры морской воды зависит от положения кромки ледового покрова, оказываясь больше в областях, покрытых льдом меньшее время. Двумерные распределения амплитуд температурных колебаний демонстрируют, что более высокочастотные (с периодами до 4.1 лет) наиболее ярко выражены на поверхности и хуже в нижележащих слоях. Колебания больших периодов (более 8 лет), напротив, проявляются практически везде. В нижележащих слоях такие колебания распространяются особенно далеко, вплоть до северной границы рассматриваемой области.

Ключевые слова: Баренцево море, Карское море, моделирование, вейвлет-анализ, колебания температуры, площадь ледового покрова, двумерные распределения амплитуд колебаний.

© V. A. Gorchakov^{1*}, A. Y. Dvornikov¹, S. M. Gordeeva^{1,2}, V. A. Ryabchenko¹

¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, 117997, Nahimovsky Pr., 36, Moscow, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, 195196, Malookhtinsky Pr., 98, St. Petersburg, Russia

*E-mail: vikfioran@yandex.ru

SPATIAL VARIABILITY OF INTERANNUAL TEMPERATURE OSCILLATIONS IN THE BARENTS SEA AND THE KARA SEA ACCORDING TO SIMULATION RESULTS

Received 19.06.2020, in final form 11.09.2020

The following article provides the research on interannual temperature oscillations of the Barents Sea and the Kara Sea based on mode results only without using the reanalysis data in the water temperature distribution during the 1 to 12-year period. Model solution of 1975–2005 received according to the two different spatial resolution model data are used for the following research. The correct representation of the researched area climate by these models is determined. Interannual water temperature oscillations amplitude magnitude may be compared to the ones of the interseasonal oscillations in the researched area. The wavelet analysis

Ссылка для цитирования: Горчаков В.А., Дворников А.Ю., Гордеева С.М., Рябченко 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

For citation: 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. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 4, 50–65. doi: 10.7868/S207366732004005X

method, providing the opportunity for the research of the periodical components despite their frequency changes, is used here to detect the periodicity and possible frequency instability. The analysis results demonstrate that the atmosphere temperature oscillations and ice cover area oscillations show the similar periods. It's worth mentioning that some of the known oscillations in the Ocean-Atmosphere system match the oscillations intervals received according to model results. In the atmosphere temperature and the water temperature oscillation of the initial data distribution the connection between the oscillations range and the ice edge position can be followed clearly. In the water and air temperature oscillations in the local points the 3 basic supporting frequencies of the presented parameters are distinguished. They correspond to the 1.0–3.6 year, 3.9–5.8 year, 6.3–10.5 year periods as well as to the basic supporting oscillation periods at the “Kola meridian” stations. Ice cover area oscillation ranges are fully contained in the stated ranges of the 3 basic water and air temperature oscillations in the researched local points of the Barents Sea and the Kara Sea. The sea oscillation intensity depends on the ice edge position and is presented mostly in the areas which are covered by the snow during the less period of time. Two-dimensional distribution of the temperature oscillation amplitudes demonstrates that the high-frequent oscillations (periods lasting up to 4.1 year) get the more evident vision on the surface and are poorly presented in the low layers. On the contrary the long period (lasting more than 8 years) oscillations appear nearly everywhere. In the low layers such oscillations can spread especially wide including the distance up to the north end of the researched area.

Key words: the Barents Sea, the Kara Sea, modeling, wavelet analysis, temperature oscillations, ice cover area, two-dimensional distribution of the oscillation amplitudes.

1. Введение

Колебания системы океан — атмосфера можно подразделить на *внутригодовые*, включающие *короткопериодные* (приливные, суточный ход солнечной радиации), *синоптические*, с периодами несколько суток в атмосфере и несколько недель в океане, *глобальные*, с периодами от недель до месяцев, *междугодичные колебания* с наибольшей интенсивностью в области периодов 2–5 лет (включая ритм колебаний зонального течения в экваториальной стратосфере, явление Эль-Ниньо в восточной части экваториальной зоны Тихого океана, колебания ветви Гольфстрима), *длиннопериодные колебания* с периодами в десятки лет (внутривековые) и сотни лет (междувековые) [1]. Предложенная А.С. Мониным классификация колебаний [1] за несколько последних десятилетий была детализирована и уточнена.

В настоящее время в междугодичных колебаниях океана и атмосферы выделяют Чандлеровские колебания с главным периодом порядка 14 месяцев, возбуждающие в атмосфере и океанах так называемый полюсный прилив, и амплитудные вариации на частоте их биений, соответствующие периодам 6.3 года [2], колебания системы Эль-Ниньо — Южное колебание, где наиболее мощными статистически-значимыми оказываются полосы повышенной спектральной плотности, приходящиеся на периоды 5.1, 3.8, 3.6 и 2.9 года, которые могут быть истолкованы как результаты откликов глобальной климатической системы на совокупное воздействие годового хода притока тепла от Солнца, субгармоникам Чандлеровского колебания полюсов Земли и к супергармоникам лунно-солнечной нутации [3]. Заметное влияние на термодинамический режим Западной Арктики способно оказывать Северо-Атлантическое колебание (САК). Однако анализ изменений САК на разных временных масштабах показывает, что нет одного преобладающего масштаба этой изменчивости. Большие изменения в индексе САК могут возникнуть как на межгодовом масштабе, так и в течение сезона и месяца. Это согласуется с представлением, что САК возникает из внутренних атмосферных процессов, в которых движения различных масштабов взаимодействуют друг с другом и генерируют случайные (и поэтому непредсказуемые) изменения. Однако в межгодовом масштабе заметна квазидвухлетняя цикличность, а также повышенная повторяемость на периоде 8–10 лет [4]. В полярных и субполярных областях Северного Ледовитого океана также выделяют 3-х, 5-ти и 10-ти летние цикличности аномалий интегрального теплосодержания в верхнем слое океана [5].

Циклы в межгодовой изменчивости температуры воды Баренцева моря исследовались в [6], где на основании данных ПИНРО были выявлены периоды колебаний температуры воды в 18.6 лет, что равно циклу нутации Земли, а также в 6.2 и 55.8 лет, что равно обертонам этого цикла. При исследовании циркуляции атмосферы и океана в районе Северо-Европейского бассейна [7] выявили периодичность 7–8 лет, которая, по предположению авторов, формируется в результате взаимодействия атмосферы, океана и льдов в системе Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана (СЛО). Кроме того, в [7] были найдены слабые колебания климатических характеристик с периодами 2–3 года, 10–12 и 20 лет. Колебание с периодом 7.7 лет в температуре воды и атмосферном приземном давлении в Северной Атлантике также было обнаружено [8]. В естественной изменчивости температуры воздуха на метеостанции Свалбард (Svalbard) Шпицбергена также были выявлены циклы с амплитудой около 0.5 °C и периодами 2.5, 5.1, 8.7, 12.3, 36.7 лет [9].

Характерной особенностью Баренцева и Карского морей является то, что изменения климатических характеристик, таких, как температура воды и площадь ледяного покрова, в современный период в них

происходят неравномерно. Так, как показано в [10], в изменении площади льда СЛО за период с 1978 по 2018 гг. наблюдается значительная межгодовая изменчивость. Прежде всего, это определяется изменениями в заливе теплой атлантической воды из Северо-Европейского бассейна. Несмотря на значимый тренд в поступлении этой воды в Баренцево море в последние десятилетия, который приводит к потеплению воды и значительному сокращению ледового покрова [11], начиная с 2016 г. отмечается уменьшение адвекции теплых вод и понижение температуры воды на основных разрезах в Баренцевом море [12].

Перечисленные исследования основаны на данных наблюдений. В связи с небольшим числом и ограниченным доступом к данным о долгосрочных наблюдениях в локальных фиксированных географических точках или разрезах в Баренцевом и Карском морях, эти исследования не в состоянии описать пространственную-временную структуру межгодовых колебаний. Этот недостаток в настоящее время можно восполнить, привлекая глобальные и региональные модели общей циркуляции океана. Одна из первых попыток такого сорта была сделана в [13], где с использованием результатов региональной вихререшающей модели океана MIT и атмосферного реанализа ERA-Interim исследовались сезонные и межгодовые вариации адвективных потоков тепла в океане и атмосфере в регионе Баренцева моря за период 1993–2012 гг. Используемые авторами вейвлет-анализ и сингулярный спектральный анализ выявили в обеих характеристиках циклы с периодами 2–4 и 5–8 лет, которые хорошо согласуются с результатами наблюдений.

В сложных модельных системах, с обратными связями, будут неизбежно возникать осцилляции в результате взаимодействия отдельных частей модельного комплекса. Наличие и распространение подобных колебаний оказывают влияние на межгодовую изменчивость решения. Следует отметить, что подавляющее большинство проявлений таких сигналов представляют собой нестационарный квазипериодический процесс. Если степень стационарности может быть легко определена обычными статистическими методами на основе расчета математического ожидания и дисперсии, то цикличность обычно предполагается неизменной и определяется стандартным разложением Фурье с выявлением частот. Этот подход имеет несколько недостатков: во-первых, если исходный цикл сильно отличается от функции синуса, в спектре проявляются несколько обертонов несущей частоты, которые могут быть приняты за самостоятельные циклы и ошибочно интерпретированы; во-вторых, с течением времени, периоды колебаний могут увеличиваться и уменьшаться, то есть может проявляться нестационарность по частоте. Для выявления этой особенности был разработан метод вейвлет-анализа [14], который позволяет исследовать циклические компоненты вне зависимости от того, как меняется их частота. Этот метод успешно применялся ранее в [см., например, 9; 13] и используется в предлагаемом исследовании.

Настоящая работа имеет целью выявление основных межгодовых колебаний температуры воды и воздуха с учетом ледяного покрова, а также оценку их пространственной структуры в Баренцевом и Карском морях в интервале от 1 до 12 лет на основе исключительно модельных решений, без привлечения данных реанализа. Рассматриваются решения, полученные на основе двух моделей разного разрешения, — глобальной и региональной, в интервале 1975–2005 гг.

2. Методы и подходы

Расчет современного климата для акваторий Баренцева, Карского и Белого морей осуществлялся в два этапа. На первом этапе, для получения «грубого» решения, выполнялись расчеты на глобальной совместной модели Мирового океана-Атмосферы. На втором, расчеты проводились с помощью региональной модели более высокого разрешения.

2.1. Описание используемых моделей

1. Модельный комплекс ROM (Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model) [15] содержит в себе совместную (океан-морской лед) модель MPIOM (Max Planck Institute Ocean Model) [16] и атмосферную модель REMO (Regional atmosphere Model) [17, 18]. Сетка океанской модели MPIOM, имея 602×416 узлов, покрывает весь Мировой океан с фокусом на исследуемую область. В районе Баренцева и Карского морей разрешение составляет приблизительно 20 км. По вертикали сетка MPIOM имеет 30 z-уровней. Атмосферная модель REMO имеет 27 уровней по вертикали с горизонтальным разрешением 37 км. Ее сетка покрывает всю Европу, часть Арктики и Северную Атлантику. Атмосферная модель REMO имеет обратную связь с океанской моделью MPIOM. На боковых границах REMO задавались данные атмосферного реанализа NCEP/NCAR [19], данные того же реанализа служили форсингом для остальной части океана вне модельной области REMO. Модельный комплекс ROM был успешно протестирован на примере Северного моря, подробное описание дано в [15].

2. Региональная модель Карского и Баренцева морей, построенная на основе общей модели циркуляции Массачусетского Технологического Института (MITgcm — Massachusetts Institute of Technology general circulation model) [20], имея более тонкое разрешение, является полностью зависимой от решения ROM в том отношении, что приводится в движение только ее данными. В качестве модели морского льда используется модель вязкопластической реологии, основанная на работах [21, 22], и впоследствии модернизированная и обобщенная в работе [23].

Совместная термогидродинамическая модель океана и льда была адаптирована для части акватории Северного Ледовитого океана, включающей Белое, Баренцево и Карское моря. Расчетная сетка является квазиортогональной, состоит из 544×518 расчетных узлов в горизонтальной плоскости и имеет 51 z-уровень. Расчетная сетка строилась таким образом, чтобы шаг по горизонтали по всему модельному домену был примерно одинаковым и равным двум морским милям. По вертикали дискретность в верхних слоях составляет 2–5 м, в нижних — до 50 м. Шаг по времени задавался равным 60 с. Период счета составлял 40 лет (1966–2005 гг.), однако, чтобы избежать включения в результаты расчета времени адаптации модели, в дальнейшем рассматривался только период с 1975 по 2005 годы.

Начальные условия, условия на открытых границах, речной сток, а также атмосферный форсинг задавались из результатов расчетов модели ROM, что обеспечивало согласованность этих полей между собой. Приливной форсинг на открытых границах задавался на основе гармонического анализа ежечасных данных скоростей течений из модели ROM. Использовались 4 гармоники: 2 полусуточных M_2 , S_2 и 2 суточных K_1 , O_1 .

Ранее валидация модели MITgcm проводилась по данным архива PIOMAS [24, 25]. Для модельного бассейна в целом средняя годовая расчетная толщина и площадь льда за 1990–2005 годы меньше их значений по данным архива PIOMAS, соответственно, на 3.9 % и 1 %. Более подробно результаты валидации приведены в [26].

Наблюдаемые [27] и рассчитанные площади ледяного покрова (осредненных за период 1975–2005 гг.) для Баренцева моря находятся в хорошем согласии (табл. 1.). Для Баренцева моря результаты расчетов по обоим моделям очень близки, модель MPIOM дает немногим более высокие значения с января по май, среднее значение площади льда по результатам MITgcm составило 0.78 млн км², модель MITgcm показала 0.76 млн км². Средняя площадь ледяного покрова Баренцева моря по данным наблюдений оказалась ниже и равна 0.67 ± 0.23 .

Иная ситуация прослеживается для Карского моря. Здесь по наблюдениям средняя площадь ледяного покрова значительно выше рассчитанной, 0.93 ± 0.18 против 0.68 и 0.61 по моделям. Сезонная изменчивость в данных моделирования оказывается значительно выше, чем в данных наблюдений, так же, как и для Баренцева моря. В Баренцевом море модели переоценивают площадь ледяного покрова, в Карском море наблюдается недооценка. По результатам моделирования площадь ледяного покрова имеет более высокую сезонную изменчивость.

Проведено также сравнение рассчитанной температуры воды с данными наблюдений на станциях разреза «Кольский меридиан» (КМ) [28] (<http://www.pinro.ru/labs/hid/kolsec22.php>). Доступные данные на станциях разреза «Кольский меридиан» (33.5° в.д.) были усреднены по пространству для станций 1–3, 3–7 и 8–10. На рис. 1 (см. вклейку) эти точки обозначены как К1–3, К3–7 и К8–10 соответственно. Точка К1–3 отнесена к станции 2 (70° с.ш.), К3–7 к станции 5 (71.5° с.ш.) и точка К8–10 к станции 9 (73.5° с.ш.).

В таблицах 2 и 3 представлены средние (1975–2005 гг.) значения температуры на станциях разреза КМ и по результатам модельных расчетов в слоях 0–50 м и 50–200 м. На станциях многолетних наблюдений модель MITgcm показывает лучший результат в сравнении с MPIOM, однако обе модели занижают значения, отмеченные на станциях разреза КМ.

Таблица 1

Средняя за период 1975–2005 гг. площадь ледяного покрова и ее среднеквадратическое отклонение по наблюдениям и результатам расчета

Average ice cover area and its RMS deviation acc. to observations and calculation results during years 1975–2005

	Набл. (млн км ²)	MPIOM (млн км ²)	MITgcm (млн км ²)
Баренцево море	0.67 ± 0.23	0.78 ± 0.43	0.76 ± 0.39
Карское море	0.93 ± 0.18	0.61 ± 0.31	0.68 ± 0.26

Таблица 2

Средняя за период 1975–2005 гг. температура воды в слое 0–50 м на станциях разреза «Кольский меридиан» и по результатам расчетов

Average water temperature in the layer 0–50 m at the Kola meridian stations and acc. to calculation results during years 1975–2005

	Температура °С в слое 0–50 м ± СКО		
	КМ	МРІОМ	МІТgcm
K1–3	4.85±2.07	2.86±2.03	3.74±1.69
K3–7	4.80±1.66	3.24±1.50	3.61±1.41
K8–10	3.97±1.52	2.17±1.76	2.81±1.59

Таблица 3

Средняя за период 1975–2005 гг. температура воды в слое 50–200 м на станциях разреза «Кольский меридиан» и по результатам расчетов

Average water temperature in the layer 50–200 m at the Kola meridian stations acc. to calculation results during years 1975–2005

	Температура °С в слое 50–200 м ± СКО		
	КМ	МРІОМ	МІТgcm
K1–3	3.83±1.31	1.66±1.14	2.95±1.22
K3–7	3.74±0.81	2.39±0.73	2.89±0.65
K8–10	3.01±0.81	2.04±0.92	2.63±0.54

2.2. Кластерный анализ, выбор репрезентативных точек, вейвлеты

Исследование временной изменчивости гидрологических характеристик на больших пространствах требует рассмотрения большого количества информации. Для «сжатия» этой информации подходит такой метод многомерной статистики как факторный анализ [29], который был применен для полей среднегодовых значений температуры поверхности моря (ТПМ), полученных по модели МІТgcm. Матрица исходных данных представляет собой 36-летние ряды (1975–2005 гг.) указанных значений ТПМ в 761 точке расчетной сетки, покрывающей Баренцево и Карское моря. Ортогональное разложение матрицы показало высокую сходимость: на 7 первых факторов приходится 79 % дисперсии всей матрицы. Перераспределение дисперсии путем второго поворота факторных осей позволило выявить районы с квази-синхронной изменчивостью ТПМ путем отнесения к ним точек, имеющих корреляцию с соответствующими факторами, превышающую 0.6. Точки, в которых эта корреляция была меньше, отнесены к фронтальным зонам. В результате в пределах Баренцева и Карского морей выделено 7 районов (рис. 1, см. вклейку), причем наибольшая дисперсия (13–18 %) отмечается в районах 1, 2, 4, её значения (11 % и 9 %) немного меньше в районах 3, 6 и минимальны (4 % и 6 %) — в районах 5 и 7.

В пределах выявленных районов с квази-синхронной межгодовой изменчивостью ТПМ за период 1975–2005 гг. были выбраны девять реперных точек для детального анализа, три из которых (Р1–Р3) располагались на западной границе акватории, три в акватории Баренцева моря (Р4–Р6) и три в акватории Карского моря (Р7–Р9). При этом, положение точек выбиралось таким образом, чтобы они располагались в основных выделенных кластерах и находились в северной, центральной и южной частях каждой акватории. В дальнейшем в этих точках проводился спектральный анализ временных рядов температуры воды и воздуха.

Для анализа межгодовых колебаний в диапазоне от 1 до 12 лет были использованы временные ряды температуры воды в указанных точках Р1–Р9, усредненные по слоям 0–50 м и 50–200 м, из решения двух моделей, МРІОМ и МІТgcm. Также анализировались ряды приземной температуры воздуха в тех же точках, рассчитанные по атмосферной модели REMO. Для оценки адекватности модельных решений, они сравнивались с данными натурных наблюдений за температурой воды Баренцева моря в слоях 0–50 м и 50–200 м на станциях разреза «Кольский меридиан» [28]. Дополнительно использовались среднемесячные оценки площади ледяного покрова Баренцева и Карского морей по данным ААНИИ за тот же период [27, 30]. Все используемые в анализе временные ряды охватывают один и тот же период с 1975 по 2005 гг. и имеют временное разрешение один месяц. Данные исходных рядов были преобразованы: был удален линейный тренд и выполнен переход к климатическим аномалиям путем вычитания среднего многолетнего сезонного хода.

В качестве основного метода исследования применялся вейвлет-анализ, который наилучшим образом подходит для спектрального анализа нестационарных по частоте процессов, поскольку несет в себе информацию об их динамике и лишен при этом недостатков оконного преобразования Фурье. В данной работе использовалось вейвлет-преобразование с базисной функцией Морле вида $\phi = e^{-x^2/2} \cos(5x)$ [14].

Полученное поле изменчивости вейвлет-коэффициентов (ВК) разложения ряда исследуемой характеристики рассматривалось как набор временных рядов ВК для каждого масштаба колебаний. Таким образом, к ним оказалось возможным применение стандартных методов анализа временных рядов, а именно, для каждого масштаба (временного ряда ВК) рассчитывалась дисперсия, что позволило сравнивать степень изменчивости (интенсивность колебания) исследуемой характеристики на конкретном масштабе в разных точках акватории.

3. Результаты

3.1. Сравнение наблюдаемых и рассчитанных колебаний температуры воды на станциях разреза «Кольский меридиан»

Говоря о межгодовой изменчивости, следует оценить вклад межгодовых колебаний температуры, возникающих в слоях водной толщи, в общую картину. Для этого проанализируем среднемесячные колебания температуры на станции КЗ–7 КМ за период 1975–2005 гг. На рис. 2 представлен ряд температуры в слое 0–50 м по данным многолетних наблюдений, из которого предварительно были удалены сезонные колебания и тренд. Представленный ряд имеет величину дисперсии $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}^2$. Разница между максимальным и минимальным значениями составляет $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Амплитуда сезонной изменчивости температуры в точке КЗ–7 составляет $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Иными словами, в точке КЗ–7 КМ, амплитуды сезонных и межгодовых колебаний являются величинами одного порядка.

Представленные на рис. 3, а – г вейвлет-скейлограммы Морле в точке КЗ–7 для температуры воды в слое 0–50 м, построенные по данным наблюдений, результатам расчета по моделям МРЮМ и МТГ-ст, и температуры воздуха по данным РЕМО, а также дисперсии вейвлет-коэффициентов Морле (рис. 3, д), позволили выделить следующие периоды значимых колебаний: 1.6–1.8, 2.3–2.9, 3.6–4.6 и 8.3–8.8 лет (табл. 4). Заметим, что амплитуды выделенных колебаний меняются со временем в течение рассматриваемого периода 1975–2005 гг., а на определённых интервалах времени они и вовсе становятся незначимыми (рис. 3, а – г).



Рис. 2. Межгодовая изменчивость температуры на станции КЗ–7 разреза «Кольский меридиан» за период 1975–2005 гг., пунктиром показан размах сезонной изменчивости для централизованного ряда.

Fig. 2. Interannual temperature variability at the K3–7 Kola meridian station during years 1975–2005. The range of seasonal variability for centered series is marked by dotted line.

Скейлограммы наблюдаемых и модельных значений температуры воды в слое 0–50 м схожи в том отношении, что и в тех и других отмечаются указанные выше значимые колебания (ср. рис. 3, а с рис. 3, б, в; см. вклейку). Вместе с тем модели значительно завышают величины наблюдаемых сигналов на первом и третьем пиках (1.6–1.8 и 3.6–4.6 года) (рис. 3, д), а второй пик (2.3–2.9 года) в этом слое по данным наблюдений не обнаруживается. Модельные решения хорошо отражают самое большое наблюдаемое колебание температуры воды на периоде 8.3–8.8 лет. Как и следовало ожидать, скейлограммы для двух модельных решений (рис. 3, б, в) качественно очень схожи, расхождения наблюдаются лишь в интенсивности колебаний в различные моменты времени. На периодах 1.6–1.8 и 8.3–8.8 лет модели МРІОМ и МІТgcm дают одинаковый по величине сигнал, а на периодах 2.7 и 4.3 года в результатах МІТgcm наблюдается более сильный всплеск. В то же время в спектре температуры воздуха (рис. 3, г) отсутствует самое короткопериодное колебание (1.6–1.8 года), а колебания на периодах 2.3–2.9 и 8.3–8.8 лет приблизительно одинаковы по значению.

Вейвлет-скейлограммы Морле в точке КЗ–7 для температуры воды в слое 50–200 м (рис. 4, см. вклейку) свидетельствует о том, что в этом слое картина колебаний качественно остаётся такой же, как и для слоя 0–50 м. С учетом слоя 50–200 м диапазоны периодов значимых колебаний температуры воды и воздуха в точке КЗ–7 несколько расширяются и составляют 1.6–1.8, 2.3–3.1, 3.6–4.6 и 8.3–9.1 лет. Заметим, что по данным наблюдений амплитуда колебаний температуры воды в слое 50–200 м в целом выросла, тогда как по модельным решениям, напротив, — уменьшилась.

Следует отметить, что во всех рассмотренных точках, помимо вышеописанных, были выявлены интенсивные колебания температуры воды и воздуха на периодах 13–15 лет. Однако в силу того, что рассматриваемые ряды имели длину 30 лет, валидность результатов на периодах около 15 лет сомнительна, и они в настоящей работе не рассматриваются.

Более детальное сравнение периодов несущих колебаний температуры воды, измеренной на станциях разреза КМ, с их значениями, рассчитанными по МРІОМ и МІТgcm, приводится в табл. 4. Как видно, рассчитанные периоды несущих колебаний (1.5–1.8, 2.7–3.1, 3.5–4.3, 8.4–9.2) хорошо согласуются с наблюдаемыми периодами (1.6–1.8, 2.7–2.8, 3.2–5.3, 7.9–8.6).

Анализ данных наблюдений и моделей в точках К1–3 и К8–10, расположенных соответственно ближе к берегу и мористее точки КЗ–7, показал, что: 1) первый пик колебаний температуры воздуха отсутствует в точках КЗ–7 и К8–10, расположенных в открытой части Баренцева моря, 2) второй пик колебаний на периодах 2.3–3.1 года не обнаружен в точке К1–3, 3) периоды колебаний температуры воды при перемещении от берега в открытое море (от точки К1–3 к точке КЗ–7) имеют тенденцию увеличиваться (табл. 4). Отмеченные особенности колебаний температуры в точке К1–3 связаны скорее всего с близостью берега и глубиной моря, меньшей 200 м. Как следует из табл. 4, согласно данным наблюдений и модельным расчетам 4 основных пика колебаний температуры воды на КМ лежат в диапазонах: 1.5–1.8, 2.7–3.1, 3.2–5.3 и 7.9–9.2 лет. Три из них 1.5–1.8, 3.2–5.3 и 7.9–9.2 прослеживаются почти всюду, исключая отсутствие колебания 3.2–5.3 лет для слоя 50–200 м в решении МРІОМ в точке КЗ–7 и на станциях 8–10 КМ. Величина пиковых колебаний температуры воды и воздуха растет с ростом их периода, так что самые значительные колебания существуют на периодах 7.9–9.2 лет.

3.2. Колебания площади ледяного покрова Баренцева и Карского морей

На скейлограмме колебаний площади ледяного покрова Баренцева моря, построенной по данным наблюдений ААНИИ (рис. 5, а), можно выделить 3 основных колебания на периодах 2.5, 5.0 и 8.2 лет, которые, с разной интенсивностью, проявляются на всем рассматриваемом периоде 1975–2005 гг. Периоды всех трёх колебаний на 0.5–1 год длиннее, чем в модельных расчетах, и имеют в несколько раз большие величины изменчивости (рис. 5, б, в и табл. 5). Структуры модельных спектров очень похожи, однако интенсивность колебаний в МРІОМ оказываются значительно выше, чем в МІТgcm. Все скейлограммы (рис. 5, а–в) демонстрируют различную структуру колебаний в периоды 1975–1993 гг. и 1994–2005 гг. (см. вклейку).

В Карском море так же, как и в Баренцевом, наблюдается 3 основных колебания площади ледяного покрова, но на других периодах: 1.2, 4.2 и 9.5 лет (рис. 6, см. вклейку). Периоды первых двух колебаний модельных решений совпадают с их значениями, оцененными по данным наблюдений, а период третьего колебания оказался меньше на 1.5–1.6 года. Как и в Баренцевом море, величины сигналов в региональной модели МРІОМ оказываются выше (примерно на 30–50 %), чем в МІТgcm, а степень изменчивости сигналов в натурных наблюдениях, в свою очередь, несколько выше, чем в модельных решениях. Отличительная особенность Карского моря состоит в том, что, согласно наблюдениям, наиболее интенсивным является второе (на периоде 4.2 года), а не третье колебание (на периоде 9.5 лет), как в Баренцевом море. Модельные колебания эту особенность не отражают: в моделях максимальную величину имеет третье колебание.

Таблица 4

Периоды локальных максимумов колебаний температуры воды и воздуха на станциях разреза «Кольский меридиан»

Local maximum periods of the water and air oscillation at the Kola meridian stations

Точка	Источник данных	Слой	Период, лет*			
K1–3	Tw, KM	0–50 м	1.7	—	3.2	7.9
		50–200 м	1.7	—	3.2	8.3
	Tw, MPIOM	0–50 м	1.5	—	3.7	9
		50–200 м	1.6	—	3.7	9
	Tw, MITgcm	0–50 м	1.5	—	3.8	8.8
		50–200 м	1.5	—	3.5	9.1
K3–7	Ta, REMO	0	1.9	—	4.4	9.2
		0	1.9	—	4.4	9.2
	Tw, KM	0–50 м	1.7	—	3.6	8.3
		50–200 м	1.7	2.7	4.3	8.6
	Tw, MPIOM	0–50 м	1.6	2.7	4.3	8.5
		50–200 м	1.6	3	—	8.7
K8–10	Tw, MITgcm	0–50 м	1.8	2.9	4.3	8.4
		50–200 м	1.7	3.1	4.3	9.1
	Ta, REMO	0	—	2.3	4.6	8.8
		0	—	2.3	4.6	8.8
	Tw, KM	0–50 м	1.6	—	5.3	8.3
		50–200 м	1.8	2.8	—	8.5

*Периоды локальных максимумов колебаний выделялись по вейвлет-скейлограммам колебаний даже в тех случаях, когда колебания существовали только в части рассматриваемого периода 1975–2005 гг.

*Periods of local maximum oscillations have been distinguished by wavelet-scalograms even if oscillations existed partly during the researched period of 1975–2005.

Отметим, что в отличие от спектров колебаний температуры воды и воздуха на станциях КМ с 4-мя основными колебаниями на периодах 1.5–1.8, 2.7–3.1, 3.2–5.3 и 7.9–9.2 лет (табл. 4), в спектрах площади ледового покрова содержится 3 основных колебания на периодах 1.1–2.5, 4.2–5 и 6.9–9.5 лет (табл. 5). Диапазон периодов колебаний площади ледяного покрова в Баренцевом море (1.7–8.2 лет) оказался несколько уже, чем в Карском море (1.1–9.5 лет).

Закljučая этот раздел, отметим, что периоды основных межгодовых колебаний площади ледового покрова в модельных решениях оказались меньше или равными периодам колебаний, оцененным по данным наблюдений, причем интенсивность наблюдаемых колебаний была значительно больше.

Таблица 5

Периоды локальных максимумов колебаний площади ледяного покрова в Баренцевом и Карском морях по данным наблюдений и моделям

Local maximum periods of the ice cover area oscillations in the Barents Sea and the Kara Sea acc. to the observation results and models

Море	Источник данных	Период, лет		
Баренцево	ААНИИ	2.5	5	8.2
	МПИОМ	1.7	4.5	6.9
	MITgcm	2	4.5	7.2
Карское	ААНИИ	1.2	4.2	9.5
	МПИОМ	1.1	4.2	7.9
	MITgcm	1.2	4.2	8

3.3. Пространственная изменчивость периодов и интенсивности основных колебаний температуры воды и воздуха в Баренцевом и Карском морях по MITgcm

Прежде чем перейти к анализу спектральных характеристик межгодовых колебаний температуры, рассмотрим пространственное распределение исходных рядов климатических аномалий результатов расчетов температуры воды в слоях 0–50 м и 50–200 м и использовавшуюся в качестве форсинга температуру воздуха в точках границы (P1–P3), Баренцева (P4–P6) и Карского (P7–P9) морей. В табл. 6 представлены максимальные и минимальные значения характеристик, а также их размахи в каждой из выбранных точек акватории.

Как видно, в распределении температуры атмосферы отчетливо прослеживается связь размахов колебаний с положением кромки ледового покрова. Так максимальные значения размахов колебаний отмечаются в областях, где ледовый покров непостоянен, но существует значительную часть года — в центральных точках границы и Баренцева моря. Несколько меньшими, но близкими по величине оказываются размахи в районах практически постоянно покрытыми льдом, таких как северные части границы, Баренцева и Карского морей. Меньшими, как и следовало ожидать, оказываются размахи колебаний в тех частях морей, в которых покрыты льдом меньшую часть года, к которым относятся южные части Баренцева и Карского морей. Минимальное же значение размахов колебаний температуры воздуха соответствует южной части границы, где в результате заточа Атлантических вод ледовый покров отсутствует в течение всего года.

Распределения колебаний температуры воды имеют иную закономерность. Минимальными оказываются размахи в областях, преимущественно покрытых льдом, в северных частях границы и акваторий морей. При смещении к югу, т. е. в область, где кромка ледяного покрова более подвижна, размахи колебаний растут, достигая максимума в южной части границы, где ледовый покров отсутствует. С увеличением глубины на границе и в Баренцевом море размахи колебаний уменьшаются. В Карском море поведение характеристики не демонстрирует устойчивых закономерностей и существенно различается в разных его частях. Так в северной части размахи колебаний оказываются больше в глубинном слое. А в южной — в поверхностном. В восточной части моря размахи колебаний в поверхностном слое максимальны для всей акватории, а в глубинном — минимальны, что возможно связано с малыми глубинами в рассматриваемой точке.

Рассчитанные по результатам MITgcm вейвлет-спектрограммы колебаний температуры воды в слоях 0–50 м и 50–200 м и температуры воздуха в приводном слое атмосферы в девяти выбранных точках (рис. 1) имеют общую тенденцию увеличения интенсивности колебаний вейвлет-коэффициентов с ростом периода. В других отношениях вейвлет-спектрограммы демонстрируют существенные различия, которые иллюстрируются на рис. 7 (см. вклейку), на котором они приведены для трех характерных точек: точки P2 на границе расчетной области, точки P5 в центре Баренцева моря и точки P9 в центре Карского моря.

Таблица 6

Максимальные и минимальные значения и размахи рядов климатических аномалий температуры воздуха и воды в слоях 0–50 и 50–200 м в выбранных точках акватории

Maximum and minimum relevance and water temperature and air temperature climate anomaly range in the layers 0–50 m, 50–200 m at the chosen points of the water area

Точки	Отклонения температуры, °C								
	Атмосфера			Слой 0–50 м			Слой 50–200 м		
	Max	Min	Размах	Max	Min	Размах	Max	Min	Размах
Точки на западной границе									
P1	11.47	–12.12	23.59	1.24	–1.14	2.38	0.99	–0.65	1.64
P2	8.51	–17.80	26.31	1.66	–1.18	2.84	1.67	–0.99	2.66
P3	3.63	–8.76	12.39	1.79	–4.34	6.13	1.52	–1.34	2.86
Точки в Баренцевом море									
P4	13.63	–9.88	23.51	0.90	–0.32	1.22	0.56	–0.66	1.22
P5	11.38	–13.01	24.39	1.95	–1.17	3.12	0.92	–1.51	2.43
P6	6.21	–13.81	20.02	2.00	–2.78	4.78	1.70	–1.69	3.39
Точки в Карском море									
P7	9.51	–13.24	22.75	0.90	–1.00	1.9	1.24	–0.77	2.01
P8	7.82	–12.39	20.21	1.18	–1.39	2.57	0.42	–0.39	0.81
P9	6.71	–12.75	19.46	1.05	–0.95	2.00	0.98	–0.49	1.47

Как видно, основные колебания в разных точках не совпадают по частоте и интенсивности как в верхнем, так и в нижнем слоях. Более того, даже в одной точке в каком-либо слое колебания могут изменять как частоту, так и интенсивность с течением времени. Колебания в одной точке в верхнем и нижнем слоях также отличаются друг от друга. Эта высокая изменчивость частоты и интенсивности колебаний затрудняет оценку несущих частот колебаний для рассматриваемого периода 1975–2005 гг. Так, в слое 0–50 м в точке Р2 (рис. 7, а) в диапазоне периодов 1–1.5 года существуют колебания невысокой интенсивности на протяжении всего периода расчета. В то же время, в интервале 1.5–3 года существуют колебания заметно большей интенсивности, но лишь в интервале 1979–1989 гг. Таким образом, наличие и величина пиков при оценке интегральных несущих частот будет существенно зависеть от интервала осреднения. Так при осреднении в интервале 1979–1989 гг. пик будет соответствовать периодам 1.5–3 года, а при осреднении после 1990 — периодам 1–1.5 года. При оценке же несущей частоты колебаний за весь период 1975–2015 гг. это приводит к появлению двух близко расположенных пиков и превышению пика колебаний с периодами 1–1.5 года над колебаниями с периодом 1.5–3 года.

В точке Р5 в верхнем 50-метровом слое (рис. 7, б) колебания малых периодов, порядка 1–1.5 лет, так же отмечаются на протяжении всего расчета, однако имеют выраженный максимум в интервале 1984–1988 гг. Колебания, соответствующие периодам 2–3 года в 1982 г., с течением времени смещаются в область больших периодов, принимая значения 3–5 лет в 1988–1996 гг. На временном же интервале после 1996 г. колебания максимальной интенсивности возникают в области периодов более 7 лет. В верхнем 50-метровом слое точки Р9 (рис. 7, в) колебания малых периодов соответствуют интервалу 2–3 года, а максимальные — интервалу 7–9 лет.

С увеличением глубины «пестрота» анализируемых результатов сохраняется. Так в точках Р2 и Р5 размахи колебаний в слое 0–50 м оказываются меньше, чем в слое 50–200 м, тогда как в точке Р9 колебания в верхнем слое оказываются несколько выше.

Распределения вейвлет-коэффициентов в остальных рассматриваемых точках демонстрируют столь же значительную изменчивость частоты и интенсивности колебаний по времени и с глубиной. Это, в свою очередь, существенно затрудняет анализ, не позволяя выявить как общие закономерности колебаний, так и отклонения от них в разных частях акватории. Поэтому, вместо анализа двумерных распределений вейвлет-коэффициентов, для выявления несущих частот основных колебаний, анализировались их дисперсии на каждой частоте. Анализируя дисперсии, следует учитывать временную изменчивость колебаний основных несущих частот, которая может привести как к появлению близкорасположенных двойных пиков, механизм появления которых был рассмотрен выше, так и к сглаживанию пика и его превращению в небольшое «плато» с последующим ростом функции или даже просто изменению наклона кривой.

Представленные на рис. 8 дисперсии вейвлет-коэффициентов температуры воды в слоях 0–50 и 50–200 м и температуры воздуха в приводном слое атмосферы в точках Р2, Р5 и Р9, отражают уже упомянутую особенность распределения вейвлет-коэффициентов — увеличение интенсивности колебаний с ростом периода. Дисперсии основных колебаний вейвлет-коэффициентов температуры воздуха больше их значений для температуры воды в Баренцевом море и меньше — в Карском море, тогда как периоды основных колебаний вейвлет-коэффициентов температуры воздуха, как правило, меньше, чем периоды основных колебаний вейвлет-коэффициентов температуры воды. С глубиной интенсивность основных колебаний коэффициентов температуры воды в диапазоне малых и средних периодов уменьшается во всех трех точках, больших периодах возрастает в Баренцевом море (точки Р2 и Р5) и уменьшается в Карском море (точка Р9).

Анализ периодов дисперсий вейвлет-коэффициентов рассматриваемых характеристик (табл. 7) показывает, что первые два основных колебания на периодах 1.0–1.7, 1.8–3.6 проявляются во всех характеристиках (как в температуре воздуха, так в слоях воды) только в центральной и южной точках границы (Р2 и Р3), в точках центральной части Баренцева и южной части Карского морей (Р5 и Р9) существует только одно колебание, а в остальных точках они проявляются не во всех (чаще всего, только в какой-либо одной) из трех рассматриваемых характеристик. Заметим, что с такой же ситуацией мы столкнулись и при анализе периодов двух первых колебаний на станциях разреза «Кольский меридиан» (см. раздел 3.1): например, второй пик колебаний на периодах 2.3–3.1 года не был обнаружен в точке К1–3. Учитывая сильную изменчивость первых двух периодов колебаний на рассматриваемом временном интервале 1975–2005 гг., близость периодов этих двух пиков, а также небольшие значения дисперсий вейвлет-коэффициентов рассматриваемых характеристик (по сравнению с дисперсиями для средних и больших периодов), было решено рассматривать 2 первые колебания, как одно. В результате были выделены следующие диапазоны 3-х основных несущих частот колебаний рассматриваемых характеристик, соответствующие периодам

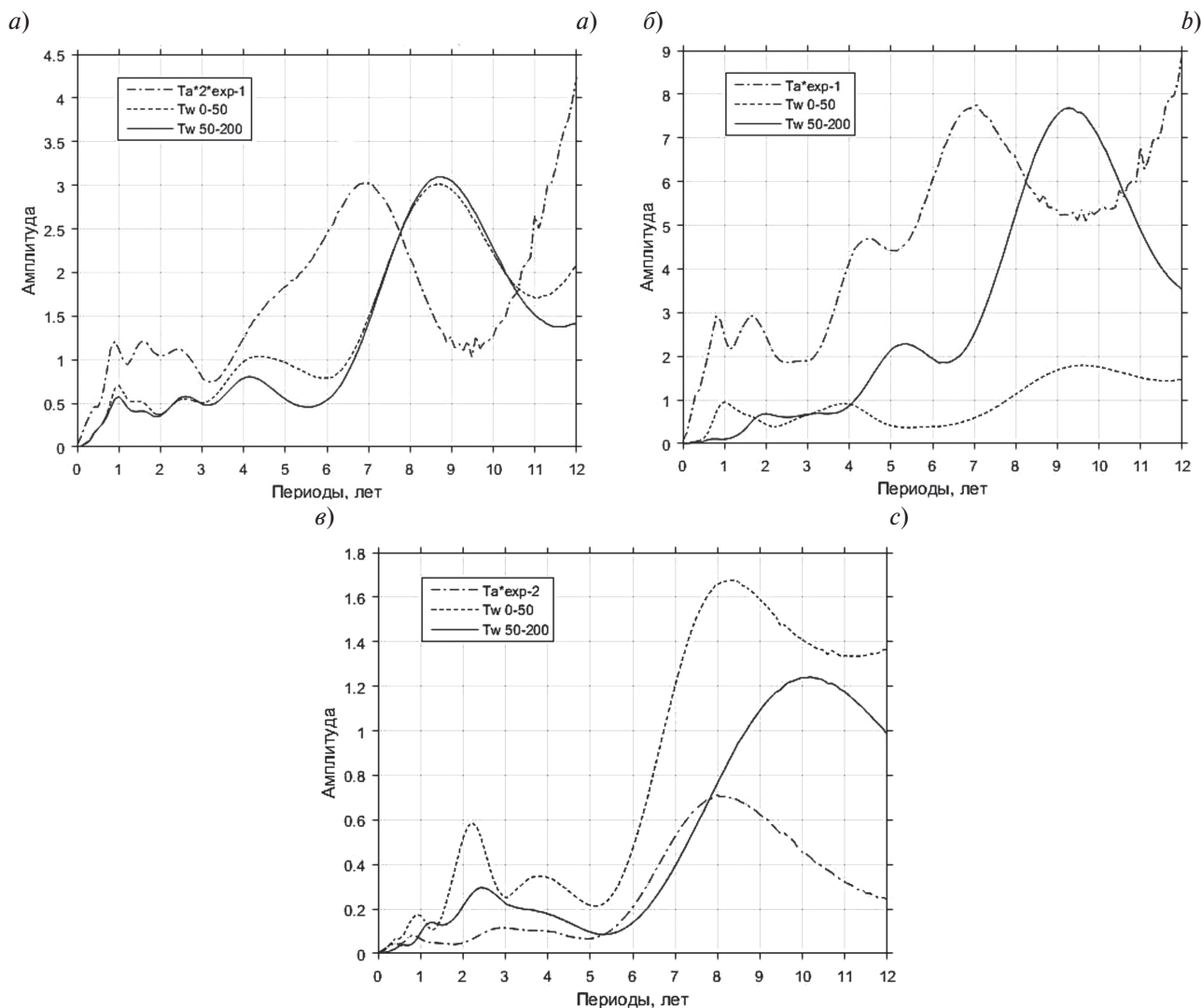


Рис. 8. Дисперсии вейвлет-коэффициентов Морле по периодам скейлограмм колебаний температуры воды в слоях 0–50 и 50–200 м и температуры воздуха в приводном слое атмосферы в точках P2 (а), P5 (б) и P9 (в).

Fig. 8. Morle wavelet coefficients' dispersions based on the periods of the scalogram water temperature oscillations in the layers 0–50 m and 50–200 m and air temperature in the near-water atmosphere layer at the P2 (a), P5 (b) and P9 (c) points.

Таблица 7

Периоды и дисперсии основных колебаний вейвлет-коэффициентов температуры воздуха в приводном слое атмосферы и температуры воды в слоях 0–50 и 50–200 м в точках P1–P9 (рис. 1) Баренцева и Карского морей

Periods and dispersions of the basic air temperature wavelet coefficients oscillations in the near-water atmosphere layer and water temperature in layers 0–50 m, 50–200 m at the points P1–P9 of the Barents Sea and the Kara Sea

Точки	Характери- стика	Малые периоды		Средние периоды		Большие периоды	
		Период, лет	Дисперсия	Период, лет	Дисперсия	Период, лет	Дисперсия
Точки на западной границе							
P1	Ta	1.4; 2.5	21.4; 18.8	—	—	7.1	48.8
	Tw 0–50	2.6	0.68	5.0	0.39	8.5	0.25
	Tw 50–200	—	—	4.2	0.79	—	—
P2	Ta	1.7; 2.5	24.3; 22.5	—	—	7.1	60.6
	Tw 0–50	1.1; 2.7	0.70; 0.55	4.4	1.04	8.7	3.02
	Tw 50–200	1.1; 2.7	0.58; 0.58	4.2	0.81	8.7	3.09

Точки	Характеристика	Малые периоды		Средние периоды		Большие периоды	
		Период, лет	Дисперсия	Период, лет	Дисперсия	Период, лет	Дисперсия
P3	Ta	1.5; 2.6	6.4; 10.4	4.5	10.11	7.9	12.94
	Tw 0–50	1.6; 2.8	1.76; 4.12	4.2	5.04	7.9	3.98
	Tw 50–200	1.5; 3.0	2.2	4.0	2.46	9.4	2.34
Точки в Баренцевом море							
P4	Ta	1.3; 2.7	19.6; 15.3	—	—	7.4	66.02
	Tw 0–50	2.1	0.09	5.8	0.12	10.0	0.28
	Tw 50–200	3.0	0.25	—	—	10.5	5.37
P5	Ta	1.8	29.3	4.6	46.9	7.1	77.54
	Tw 0–50	1.1	0.95	3.9	0.91	9.4	1.78
	Tw 50–200	2.1	0.68	5.4	2.29	9.3	7.68
P6	Ta	2.1	14.88	5.0	19.24	9.6	41.18
	Tw 0–50	2.9	3.41	—	—	—	—
	Tw 50–200	3.0; 3.6	1.78; 1.77	—	—	—	—
Точки в Карском море							
P7	Ta	1.0	10.64	—	—	8.0	73.7
	Tw 0–50	1.0; 1.8	0.18; 0.17	—	—	6.3	0.57
	Tw 50–200	1.2	0.13	5.4	1.72	9.3	2.33
P8	Ta	1.5; 2.4	9.48; 8.60	4.7	28.16	8.0	41.97
	Tw 0–50	1.2; 2.7	0.28; 0.30	—	—	7.3	1.19
	Tw 50–200	1.1	0.03	4.7	0.14	—	—
P9	Ta	3.0	11.68	—	—	8.0	71.26
	Tw 0–50	2.3	0.59	3.9	0.35	8.3	1.67
	Tw 50–200	2.5	0.30	—	—	10.0	1.24

1.0–3.6 года, 3.9–5.8 и 6.3–10.5 лет. Эти диапазоны хорошо согласуются с диапазонами периодов основных несущих колебаний, полученных на станциях «Кольского меридиана» (см. раздел 3.1), если объединить диапазоны первых двух колебаний: 1.5–3.1, 3.2–5.3 и 7.9–9.2 лет. Кроме того, диапазоны периодов 3-х основных колебаний площади ледового покрова (1.1–2.5, 4.2–5 и 6.9–9.5 лет) (см. раздел 3.2) полностью содержатся в указанных диапазонах 3-х основных колебаний температуры воды и воздуха в 9 выбранных точках Баренцева и Карского морей.

Заметим, что три пика колебаний отмечаются не в каждой точке: 1) в колебаниях коэффициентов температуры воды в южной части Баренцева моря (точка P6) полностью отсутствуют второй и третий пики, а в северной и южной частях границы, а также восточной и южной частях Карского моря (точки P1, P4, P8, P9) некоторые пики встречаются только в одном из слоев; 2) в колебаниях вейвлет-коэффициентов температуры воздуха пик в диапазоне средних периодов существует только в точках в центральной части Баренцева и восточной части Карского морей (точки P5 и P8).

Дисперсии основных колебаний вейвлет-коэффициентов температуры воды в разных слоях существенно меняется в зависимости от точки и периода. Так, в точках акваторий Баренцева и Карского морей (P4–P9) дисперсия первого колебания на малых периодах, как правило, несколько больше в верхнем слое 0–50 м, тогда как дисперсия третьего колебания на больших периодах, наоборот, оказалась существенно больше в нижнем слое 50–200 м. Эта закономерность отсутствует в точках границы (P1–P3): в точке P2 колебания в обоих слоях сопоставимы на всех периодах, а в точке P3, расположенной в зоне залива Атлантических вод, все колебания в верхнем слое оказались более интенсивными, чем в нижнем.

Как и следовало ожидать, интенсивность колебаний температуры воды зависит от положения кромки ледового покрова. В северной части акваторий, где лед существует в течение всего года (точки P1, P4), интенсивность колебаний оказывается минимальной. В точках, где ледовый покров в летние месяцы отсутствует (P2, P5–P9) интенсивность колебаний возрастает с севера на юг, причем оказывается больше в областях, покрытых льдом меньшее время.

Сопоставление дисперсий температуры воздуха на различных периодах с исходными рядами отклонений в рассматриваемых точках демонстрирует сохранение выявленных в исходных рядах тенденций для точек границы и Баренцева морей, причем наибольший вклад в суммарное колебание вносят большие

периоды. В Карском море закономерность уменьшения размахов колебаний температуры воздуха с севера на юг на различных периодах не сохраняется, т. к. в отличие от северной и южной частей моря, в восточной части существенным оказывается вклад колебаний средних периодов.

В распределениях дисперсий температуры воды малых и больших периодов, где пики существуют во всех рассматриваемых точках, на границе и в Баренцевом море сохраняется закономерность, присущая исходным рядам, а именно — рост интенсивности колебаний с севера на юг и уменьшение их с увеличением глубины. В Карском море сохраняется лишь закономерность роста величины дисперсии с увеличением периода. В то же время выявленная для исходных рядов закономерность нарушается на малых и больших периодах, ввиду появления в глубинном слое в северной и восточной частях моря и в поверхностном слое южной части моря значимых пиков на средних периодах.

3.4. Пространственная изменчивость Фурье-амплитуд колебаний основных периодов верхнего слоя моря

В разделах 3.1–3.3 были определены диапазоны периодов основных межгодовых колебаний в температуре воды и воздуха и в площади ледяного покрова в Баренцевом и Карском морях. Здесь мы рассмотрим горизонтальную структуру основных колебаний температуры верхнего слоя моря. Поскольку выявленные сигналы нестационарны, необходимо задаться некоторыми фиксированными частотами, которые характерны для обоих модельных решений и данных натурных наблюдений, и на этих частотах выделить сигнал в каждой точке модели, затем построить распределения амплитуд в пространстве.

Как показано в разделах 3.1–3.3, в межгодовых колебаниях рассматриваемой акватории выделяются 4 основных диапазона: 1.1–1.9, 2.3–3.5, 3.9–5.8 и 6.3–10.5 лет. Наиболее интенсивными из них являются колебания больших периодов, 3.9–5.8 и 6.3–10.5 лет. Для указанных диапазонов были выбраны средние значения периодов: 1.7, 2.9, 4.1 и 8.7 лет. Используя классическое преобразование Фурье, были рассчитаны амплитуды этих колебаний в Баренцевом и Карском морях по результатам модели MITgcm, пространственные распределения которых приведены на рис. 9 (см. вклейку). Схожесть результатов модельных расчетов позволяет использовать данные одной модели.

Как видно из рис. 9, амплитуды колебаний температуры воды в верхнем слое с периодом 8.7 лет достигают максимальных значений $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ вблизи положения средней климатической кромки ледяного покрова в Баренцевом море. В Карском море колебание на этом периоде отмечается только у побережья, наиболее сильно проявляясь в устьевой зоне Оби и Енисея. В слое 50–200 м колебания с периодом 8.7 лет охватывают всю акваторию Баренцева моря, максимумы амплитуд (до $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) растягиваются от Кольского полуострова до Земли Франца-Иосифа. Для колебания с периодом 4.1 года складывается похожая ситуация. Однако, в отличие от сигнала с периодом 8.7 лет, отмечается существенное падение амплитуды в открытой зоне, свободной ото льда в течение всего года, около Кольского полуострова. Максимумы амплитуд колебания на периоде 4.1 года в верхнем слое выражены более ярко, достигая $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ год, и также отмечаются около средней климатической кромки ледяного покрова. Однако в глубоких слоях отмечается существенное падение амплитуд в максимуме, колебания распространяются не так далеко на север, преимущественно вдоль побережья Северной земли.

На более коротких периодах, 2.9 и 1.7 лет, колебания температуры в верхнем слое также наиболее заметны в зонах свободных ото льда и около его климатической кромки, а в нижележащих слоях затухают, не распространяясь по акватории.

Следует отметить, что в Карском море, в слое 50–200 м, колебания практически всех периодов отсутствуют. Исключением являются колебания на периодах 4.1 и 8.7 лет, но и эти колебания, распространяясь из Баренцева моря, преимущественно ограничиваются изобатой 200 м, преодолевая ее лишь в ряде случаев.

Из сказанного выше следует, что наибольшие амплитуды колебаний температуры воды в верхнем слое воды приходятся на зоны наибольшей вариативности площади ледяного покрова, т. е. на зоны активного роста и таяния льда.

4. Выводы

1. Во временном ходе рассчитанных рядов температуры воды на станциях разреза «Кольский меридиан» присутствуют колебания тех же периодов, что и в данных наблюдений. Амплитуды межгодовых колебаний температуры воды в исследуемом районе имеют величины сравнимые с амплитудой сезонных колебаний. Колебания температуры атмосферы, верхних слоев океана и площади ледяного покрова имеют схожие периоды, а именно: 1.1–1.9, 2.3–3.5, 3.9–5.8 и 6.3–10.5 лет, причем некоторые известные колебания в системе океан-атмосфера укладываются в интервалы колебаний, найденных в модельных решениях.

2. В распределении температуры атмосферы исходных рядов отчетливо прослеживается связь размахов колебаний с положением кромки ледового покрова.

3. В колебаниях температуры воды и воздуха в локальных точках выделены диапазоны 3-х основных несущих частот колебаний рассматриваемых характеристик, соответствующие периодам 1.0–3.6 года, 3.9–5.8 и 6.3–10.5 лет, хорошо согласующиеся с диапазонами периодов основных несущих колебаний на станциях разреза «Кольский меридиан». Диапазоны периодов 3-х основных колебаний площади ледового покрова (1.1–2.5, 4.2–5 и 6.9–9.5 лет) полностью содержатся в указанных диапазонах 3-х основных колебаний температуры воды и воздуха 9 локальных точек Баренцева и Карского морей.

4. Интенсивность колебаний температуры морской воды зависит от положения кромки ледового покрова. В областях, где лед существует в течение всего года, интенсивность колебаний минимальна. Интенсивность колебаний оказывается больше в областях, покрытых льдом меньше время.

5. Двумерные распределения амплитуд колебаний температуры демонстрируют, что более высокочастотные (до 4.1 лет) наиболее ярко выражены на поверхности и хуже распространяются в нижележащие слои. Колебания больших периодов (более 8 лет), напротив, проявляются практически везде, где хоть небольшой период времени в году море становится свободным ото льда.

5. Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема 0149–2019–0015).

Литература

1. Монин А.С. Введение в теорию климата. Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. 246 с.
2. Горшков В.Л. О влиянии полюсного прилива Земли на сейсмическую активность // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2015. Сер. 1. Том 2 (60). Вып. 4. С. 646–656.
3. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 2. Междугодовые ритмы Эль-Ниньо — Южного колебания // Известия вузов «ПНД». 2017. Т. 25, № 5. С. 5–25.
4. Несмеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада, 2013. 144 с.
5. Madhusoodanan M.S., Thompson B. Decadal variability of the Arctic Ocean thermal structure // Ocean Dyn. 2011. V. 61, № 7. P. 873–880.
6. 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 Res. Part I: Oceanographic Research Papers. 2008. V. 55, N 10. P. 1201–1217. doi: <http://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.06.003>
7. 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.
8. Da Costa E., De Verdiere C. The 7.7-year North Atlantic Oscillation // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2002. N128. P. 797–817.
9. Humlum O., Solheim J.-E., Stordahl K. Spectral Analysis of the Svalbard Temperature Record 1912–2010 // Adv. Meteor.-2011. Article ID175296, 14 p. doi: 10.1155/2011/175296
10. 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
11. 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.
12. Jelmert A. 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> (дата обращения: 09.06.2020).
13. Башмачников И.Л., Юрова А.Ю., Бобылев Л.П., Весман А.В. Сезонная и межгодовая изменчивость потоков тепла в районе Баренцева моря // Изв.-РАН. Физ. атм. и океана. 2018. Т. 54, № 2. С. 239–249. doi: 10.7868/S0003351518020149
14. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1170.
15. 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 // J. Adv. Model. Earth Syst. 2015. V. 7. P. 268–304.
16. 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 Model. 2003. V. 5. P. 91–127.

17. Jacob D. A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2001. V. 77. P. 61–73. <https://doi.org/10.1007/s007030170017>
18. Jacob D., Van den Hurk B., Andrae U. et al. A comprehensive model inter-comparison study investigating the water budget during the BALTEX-PIDCAP period // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2001. V. 77. P. 19–43. doi: <https://doi.org/10.1007/s007030170015>
19. Kistler R. et al. The NCEP/NCAR50 year reanalysis: Monthly-means CD-ROM and documentation // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2001. V. 82. P. 247–267.
20. 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 // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102(C3). P. 5753–5766.
21. Hibler, III, W.D. A dynamic thermodynamic sea ice model // *J. Phys. Oceanogr.* 1979. V. 9. P. 815–846.
22. Hibler, III, W.D. Modeling a variable thickness sea ice cover // *Mon. Wea. Rev.* 1980. V. 1. P. 1943–1973.
23. Zhang J., Hibler, III, W.D. On an efficient numerical method for modeling sea ice dynamics // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102(C4). P. 8691–8702.
24. Zhang J.L., Rothrock D.A. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates // *Mon. Wea.-Rev.* 2003. V. 131. P. 845–861.
25. Schweiger A., Lindsay R., Zhang J., Steele M., Stern H. Uncertainty in modeled arctic sea ice volume // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. C00D06. doi: 10.1029/2011JC007084
26. Мартынов С.Д., Дворников А.Ю., Рябченко В.А., Сеин Д.В., Гордеева С.М. Изучение связи первичной продукции и морского льда в арктических морях: оценки на основе малокомпонентной модели морской экосистемы // *Фундам. прикл. гидрофиз.* 2018. Т. 11, № 2. С. 108–117. doi: 10.7868/S2073667318020107
27. Mahoney A.R., Barry R.G., Smolyanitsky V., Fetterer F. Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933–2006 // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. C11005. doi: 10.1029/2008JC004830
28. Карсаков А.Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900–2008 гг. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. 139 с.
29. Смирнов Н.П., Вайновский П.А., Тимов Ю.Э. Статистический диагноз и прогноз океанологических процессов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 198 с.
30. Sea Ice Edge Location and Extent in the Russian Arctic, 1933–2006, Version 1. <https://nsidc.org/data/G02182/versions/1> (дата обращения: 18.04.2020).

References

1. Monin A.S. Theory of climate introduction. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1982. 246 p. (in Russian).
2. Gorshkov V.L. The influence of the Earth pole tide on the seismic activity. *Izvestia of the St. Petersburg University*. 2015, 1, 2 (60), 4, 646–656 p. (in Russian).
3. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Chaos and order in the atmosphere dynamics. Part 2. Interannual rhythms of El Nino — South fluctuation. *Izvestia Vuzov PND*. 2017, 25, 5, 5–25 (in Russian).
4. Nesterov E.S. Northatlantic fluctuation: the atmosphere and the ocean. *Moscow, Triada Ltd.*, 2013. 144 p. (in Russian).
5. Madhusoodanan M.S., Thompson B. Decadal variability of the Arctic Ocean thermal structure. *Ocean Dyn.* 2011, 61, 7, 873–880.
6. 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 Res. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2008, 55, 10, 1201–1217. doi: 10.1016/j.dsr.2008.06.003
7. Smirnov N.P., Vorobiev V.N., Drozdov V.V. Atmosphere and ocean influence centre in the North Atlantic. *Uchenye Zapiski RSHMU*. 2010, 15, 117–134 p. (in Russian).
8. Da Costa E., De Verdiere C. The 7.7-year North Atlantic Oscillation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2002, 128, 797–817.
9. Humlum O., Solheim J.-E., Stordahl K. Spectral Analysis of the Svalbard Temperature Record 1912–2010. *Adv. Meteor.* 2011, Article ID175296, 14 p. doi: 10.1155/2011/175296
10. Julin A.V., Vyazigina E.S. Interannual and seasonal variability of the ice area in the Arctic ocean according to the satellite data. *Russian Arctic*. 2019, 7, 28–40. doi: 10.24411/2658–4255–2019–10073
11. 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.
12. Jelmert A. et al. Status for miljøet i Barentshavet. Rapport fra Overvåkingsgruppen 2020. *Havforskningsinstituttet*, 2020. URL: <https://www.hi.no/hi/nettrapporter/rapport-fra-havforskningen-2020-13> (date of access: 09.06.2020).

13. Bashmachnikov I.L., Yurova A.Y., Bobylev L.P. et al. Seasonal and Interannual Variations of Heat Fluxes in the Barents Sea Region. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2018, 54, 213–222. doi: <https://doi.org/10.1134/S0001433818020032>
14. Astaf'eva N.M. Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Phys. Usp.* 1996, 39, 1085–1108. doi: 10.1070/PU1996v039n11ABEH000177
15. 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. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2015, 7, 268–304.
16. 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 Model.* 2003, 5, 91–127.
17. Jacob D. A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorol. Atmos. Phys.* 2001, 77, 61–73. <https://doi.org/10.1007/s007030170017>
18. Jacob D., Van den Hurk B., André U. et al. A comprehensive model inter-comparison study investigating the water budget during the BALTEX-PIDCAP period. *Meteorol. Atmos. Phys.* 2001, 77, 19–43. doi: 10.1007/s007030170015
19. Kistler R. et al. The NCEP/NCAR50 year reanalysis: Monthly-means CD-ROM and documentation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2001, 82, 247–267.
20. 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. *J. Geophys. Res.* 1997, 102(C3), 5753–5766.
21. Hibler III W.D. A dynamic thermodynamic sea ice model. *J. Phys. Oceanogr.* 1979, 9, 815–846.
22. Hibler III W.D. Modeling a variable thickness sea ice cover. *Mon. Wea. Rev.* 1980, 1, 1943–1973.
23. Zhang J., Hibler III W.D. On an efficient numerical method for modeling sea ice dynamics. *J. Geophys. Res.* 1997, 102(C4), 8691–8702.
24. Zhang J.L., Rothrock D.A. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates. *Mon. Wea. Rev.* 2003, 131, 845–861.
25. Schweiger A., Lindsay R., Zhang J., Steele M., Stern H. Uncertainty in modeled arctic sea ice volume. *J. Geophys. Res.* 2011, 116, C00D06. doi: 10.1029/2011JC007084
26. Martynov S.D., Dvornikov A.Y., Ryabchenko V.A., Sein D.V., Gordeeva S.M. The research on the initial products and sea ice connection in arctic seas: valuation based on low-order model of the sea ecosystem model. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2018, 11, 2. 108–117 p. doi: 10.7868/S2073667318020107 (in Russian).
27. Mahoney A.R., Barry R.G., Smolyanitsky V., Fetterer F. Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933–2006. *J. Geophys. Res.* 2008, 113, C11005. doi: 10.1029/2008JC004830
28. Karsakov A.L. Oceanographic research on the Kola meridian in the Barents Sea during years 1900–2008. *Murmansk, PINRO*, 2009. 139 p. (in Russian).
29. Smirnov N.P., Vainovskiy P.A., Titov Y.E. Statistical diagnosis and prognosis of the oceanological process. *St. Petersburg, Gidrometeoizdat*, 1992. 198 p. (in Russian).
30. Sea Ice Edge Location and Extent in the Russian Arctic, 1933–2006, Version 1. URL: <https://nsidc.org/data/G02182/versions/1> (date of access: 18.04.2020).

К статье Горчаков В.А., Дворников А.Ю., Гордеева С.М., Рябченко В.А. Пространственная изменчивость межгодовых колебаний температуры Баренцева и Карского морей...
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...

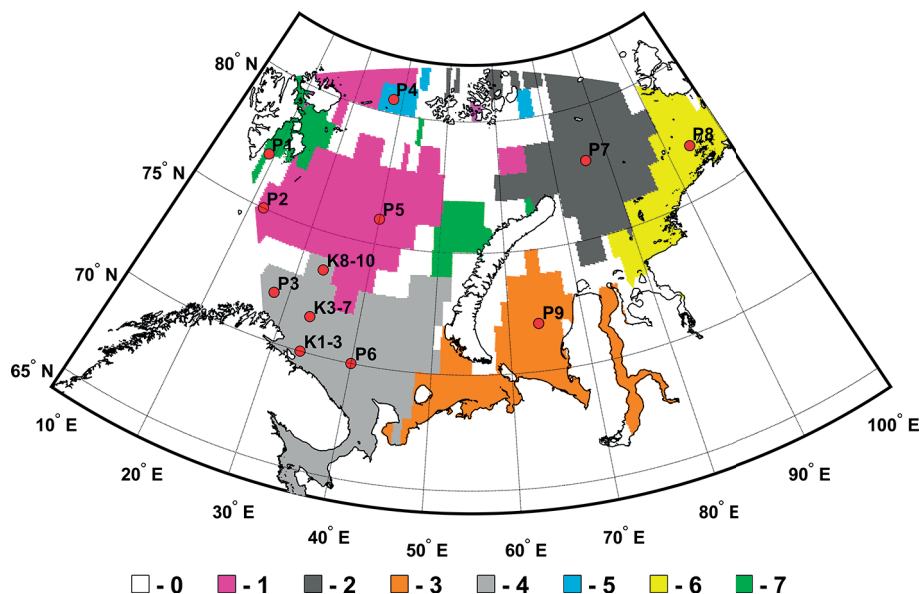
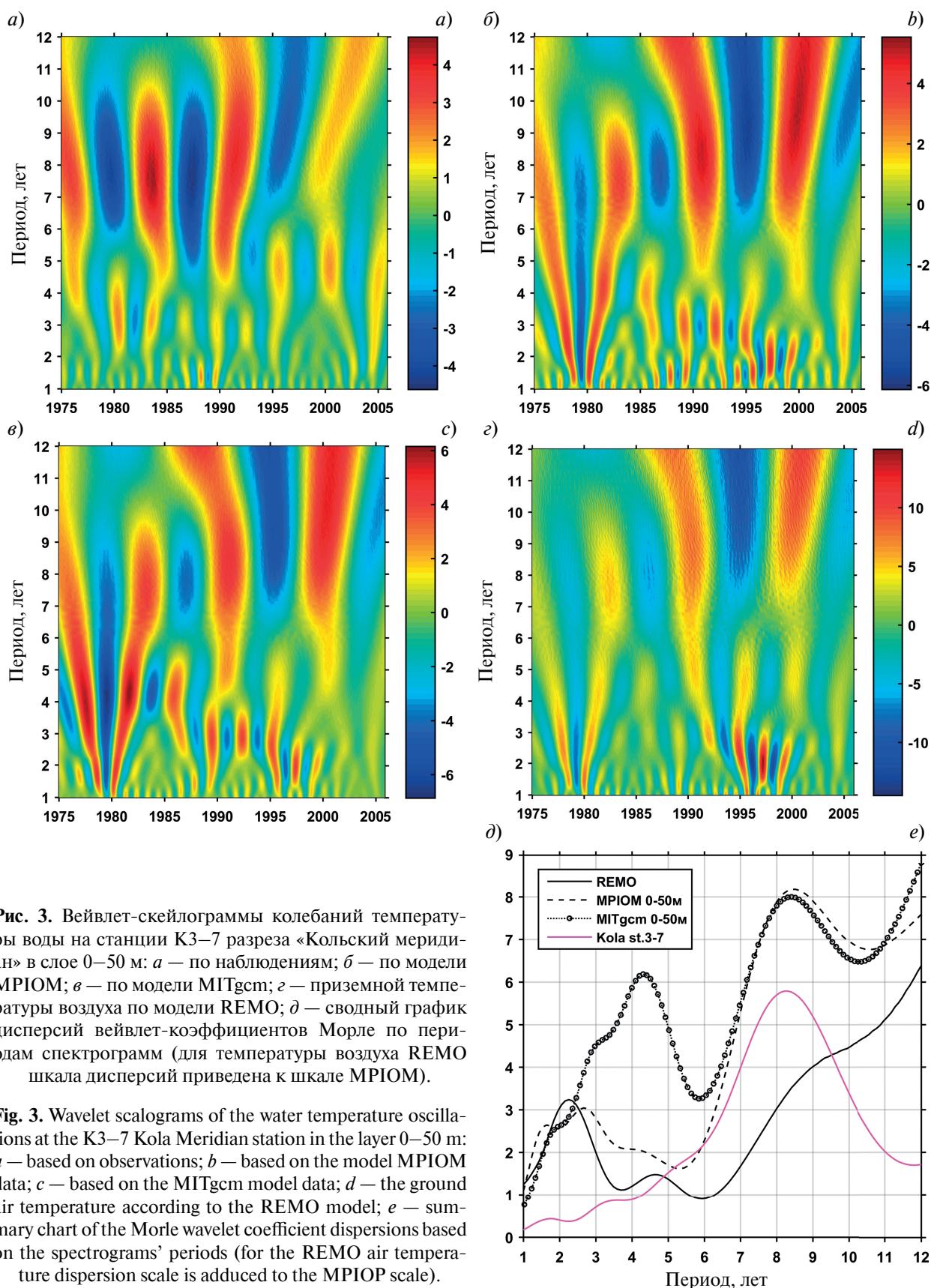


Рис. 1. Результаты факторного анализа: районы 1–7 с квазисинхронной межгодовой изменчивостью ТПМ за период 1975–2005 гг. по модели MITgcm. Район, обозначенный числом 0, не связан ни с одним из факторов и относится к фронтальной зоне. Красным показано расположение исследуемых точек.

Fig. 1. Factor analysis results: areas 1–7 with quasi-synchronos interannual variability SST during years 1975–2005 according to the MITgcm model. Zero marked area is not connected to any of the factors and is the part of the frontal zone. The positions of the researched points are marked red.

К статье Горчаков В.А., Дворников А.Ю., Гордеева С.М., Рябченко В.А. Пространственная изменчивость межгодовых колебаний температуры Баренцева и Карского морей...
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...



К статье Горчаков В.А., Дворников А.Ю., Гордеева С.М., Рябченко В.А. Пространственная изменчивость межгодовых колебаний температуры Баренцева и Карского морей...
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...

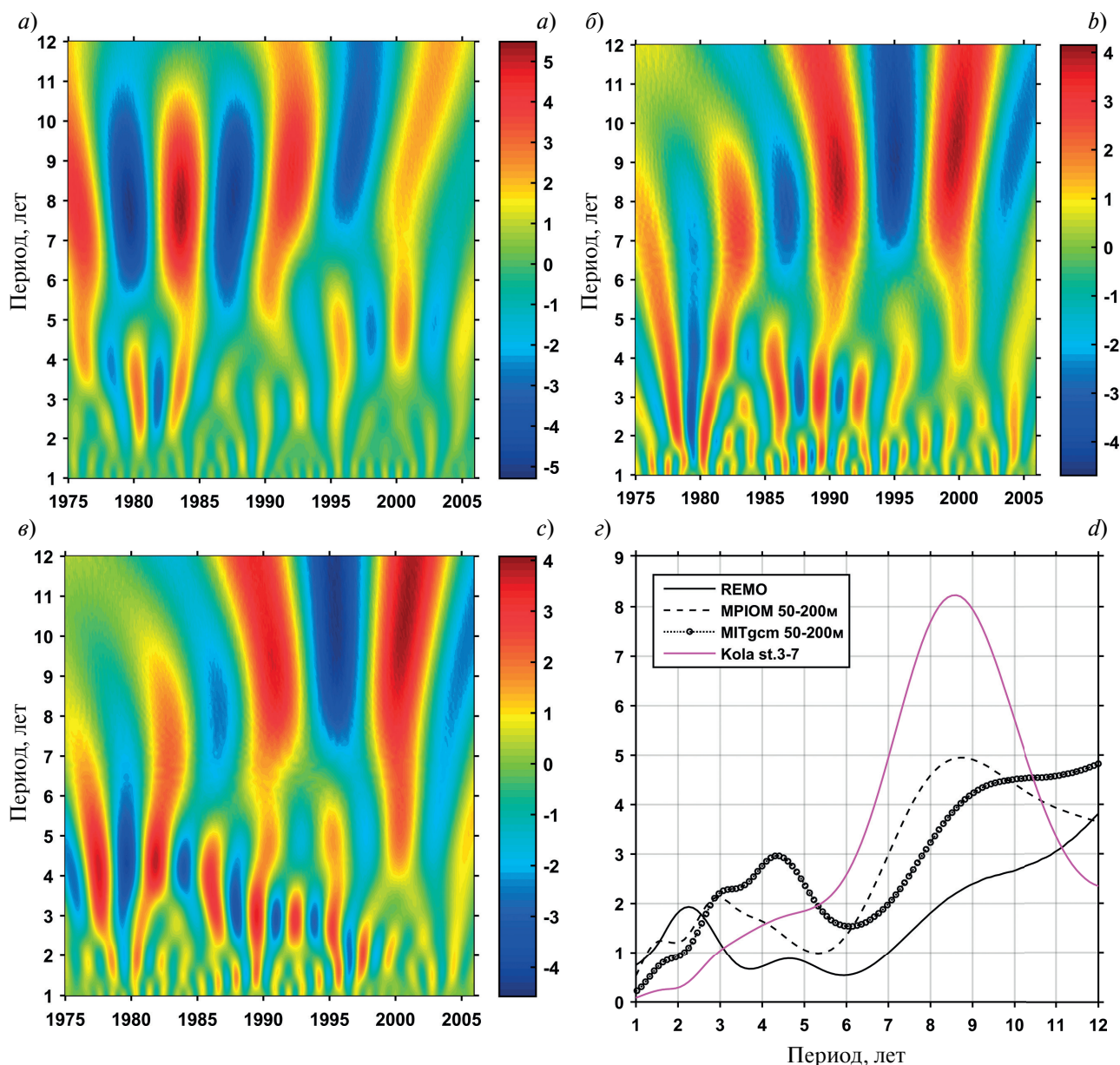


Рис. 4. Вейвлет-скейлограммы колебаний температуры воды на станции К3–7 разреза «Кольский меридиан» в слое 50–200 м: *a* — по наблюдениям; *b* — по модели МРІОМ; *в* — по модели МІТgcm; *г* — сводный график дисперсий вейвлет-коэффициентов Морле по периодам спектрограмм (для температуры воздуха REMO шкала дисперсий приведена к шкале МРІОМ).

Fig. 4. Wavelet scalograms of the water temperature oscillations at the K3–7 Kola Meridian station in the layer 50–200 m: *a* — based on observations; *b* — based on the model MPIOM data; *c* — based on the MITgcm model data; *d* — summary chart of the Morlet wavelet coefficient dispersions based on the spectrograms' periods (for the REMO air temperature dispersion scale is added to the MPIOP scale).

К статье Горчаков В.А., Дворников А.Ю., Гордеева С.М., Рябченко В.А. Пространственная изменчивость межгодовых колебаний температуры Баренцева и Карского морей...
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...

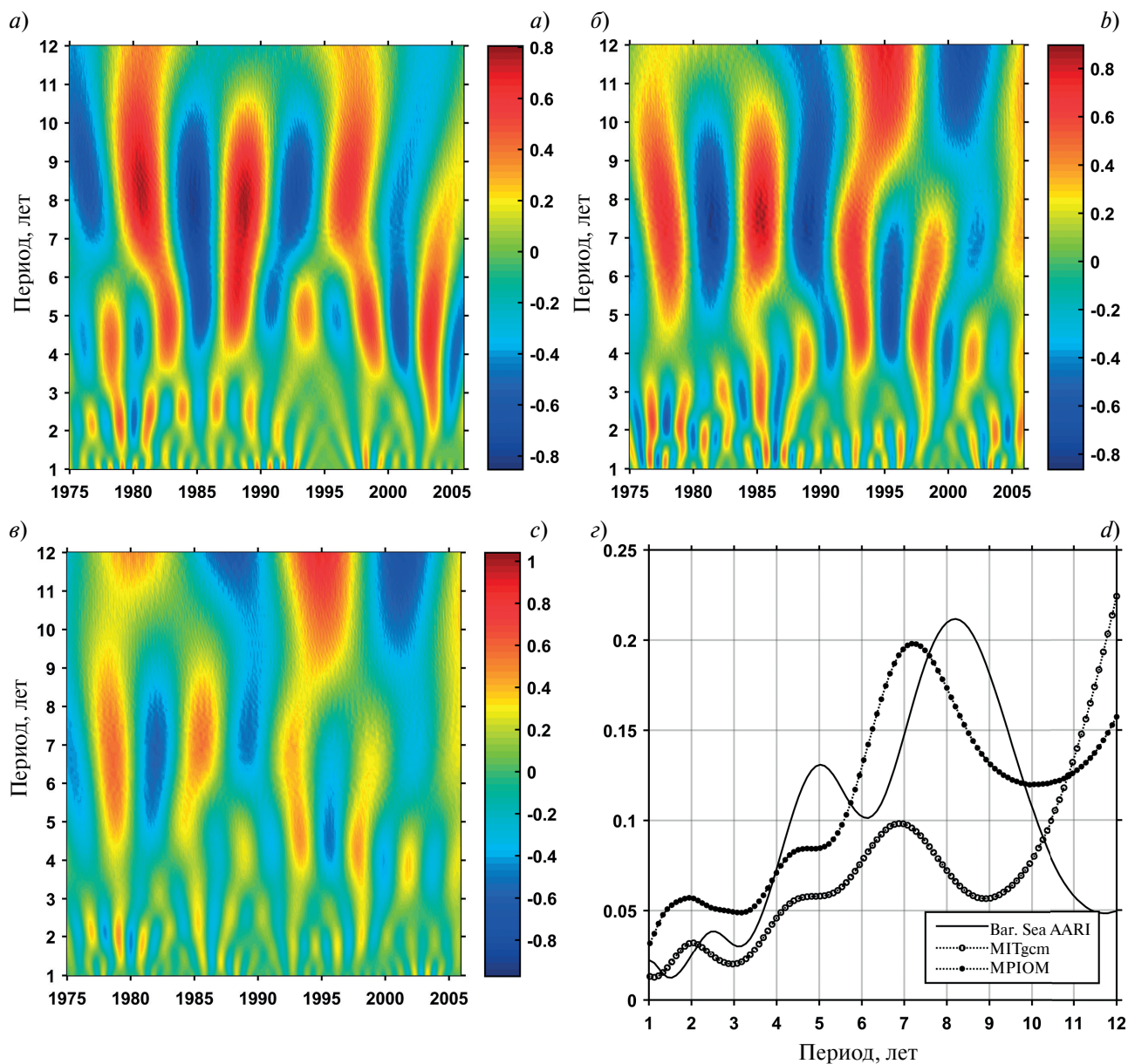


Рис. 5. Вейвлет-скейлограммы колебаний площади ледяного покрова Баренцева моря: *a* — по данным ААНИИ; *б* — по модели МРІОМ; *в* — по модели МІТgcm; *г* — сводный график дисперсий ВК по периодам скейлограмм.

Fig. 5. Wavelet scalograms of the ice area oscillations of the Barents Sea according to the: *a* — AANII data; *b* — MPIOM model data; *c* — MITgcm model data; *d* — summary chart of wavelet coefficients' dispersions acc. to the scalograms periods.

К статье Горчаков В.А., Дворников А.Ю., Гордеева С.М., Рябченко В.А. Пространственная изменчивость межгодовых колебаний температуры Баренцева и Карского морей...
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...

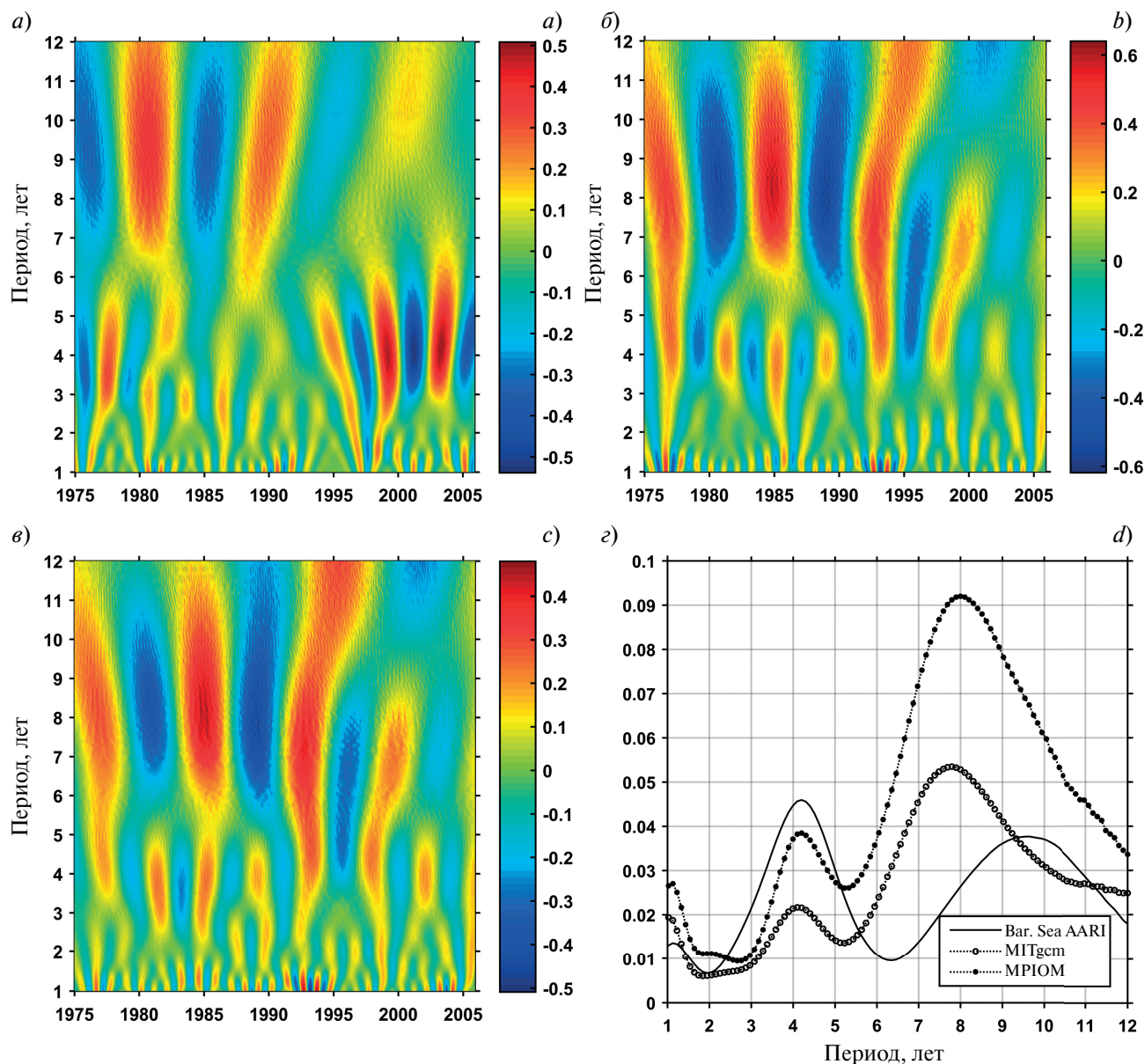


Рис. 6. Вейвлет-скейлограммы колебаний площади ледяного покрова Карского моря: *a* — по данным ААНИИ; *b* — по модели МРІОМ; *c* — по модели MITgcm; *d* — сводный график дисперсий по периодам скейлограмм.

Fig. 6. Wavelet scalograms of the ice area oscillations of the Kara Sea according to the: *a* — AANII data; *b* — MPIOM model data; *c* — MITgcm model data; *d* — summary chart of dispersions acc. to the scalograms periods.

К статье Горчаков В.А., Дворников А.Ю., Гордеева С.М., Рябченко В.А. Пространственная изменчивость межгодовых колебаний температуры Баренцева и Карского морей...
 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...

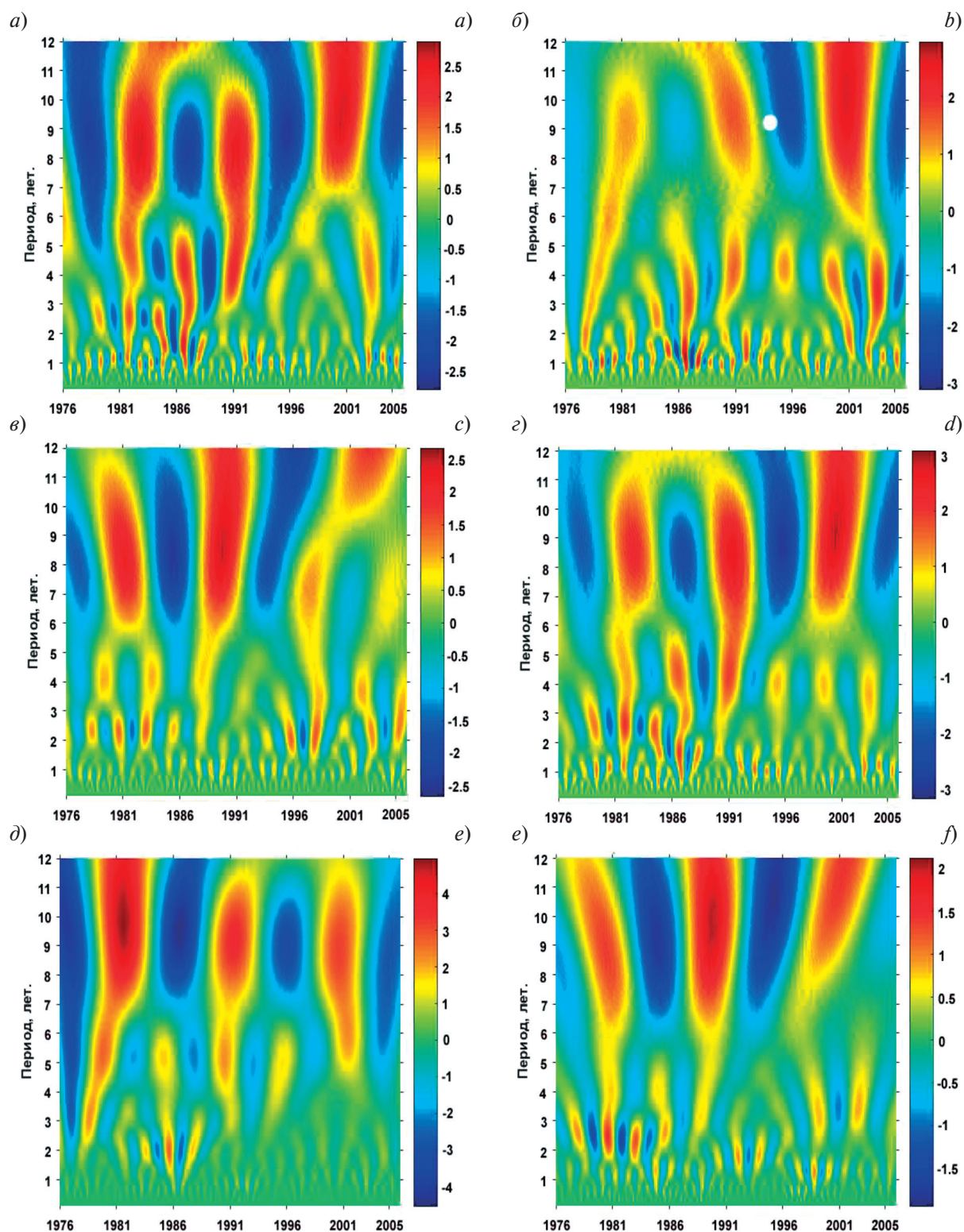


Рис. 7. Вейвлет-скейлограммы колебаний температуры воды в слоях 0–50 и 50–200 метров в точках P2 (фрагменты а и г, соответственно), P5 (б и д) и P9 (в и е) по модели MITgcm.

Fig. 7. Wavelet scalograms of the water temperature oscillations in the layers 0–50 m, 50–200 m at the points P2 (parts a and r correspondingly), P5 (b and d) and P9 (c and f) based on the MITgcm model.

К статье Горчаков В.А., Дворников А.Ю., Гордеева С.М., Рябченко В.А. Пространственная изменчивость межгодовых колебаний температуры Баренцева и Карского морей...
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...

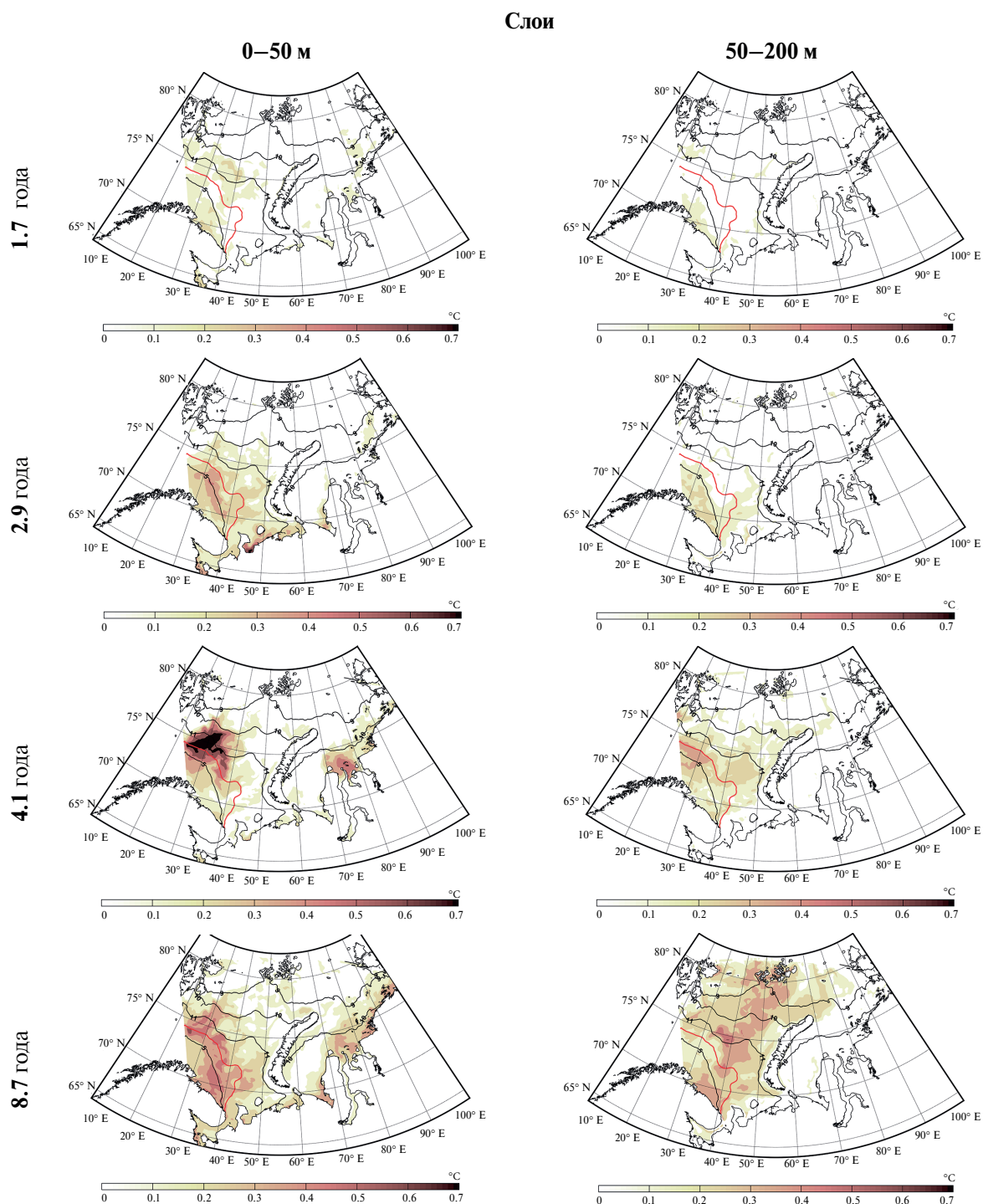


Рис. 9. Амплитуды колебаний температуры воды (°C) по данным модели MITgcm в слоях 0–50 и 50–200 метров на различных периодах. Красная и черные линии — соответственно климатическое среднегодовое и среднемесячные (в мае, сентябре, октябре и ноябре) положения кромки ледяного покрова, определенные по 15-процентной концентрации льда в ячейке сетки.

Fig. 9. Water temperature oscillation amplitudes (°C) acc. to MITgcm model data in layers 0–50 m, 50–200 m during different periods. Interannual climate and monthly (May, September, October, November) ice edge positions, defined by 15 percent ice density in the grid mesh, are marked by red and black lines correspondingly.