

УДК 551.583

© И. В. Серых¹, А. Г. Костяной^{1,2}

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва

² Московский Университет им. С. Ю. Витте, г. Москва

iserykh@ocean.ru

О КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Статья поступила в редакцию 15.02.2019, после доработки 27.05.2019

Анализ среднемесячных данных температуры Балтийского моря на поверхности и различных глубинах показал ее существенный рост за последние десятилетия. Вместе с этим наблюдаемый рост температуры распределен по акватории Балтийского моря неравномерно: так, наиболее сильно температура повысилась в Финском и Рижском заливах. На фоне этого роста обнаружены колебания температуры с периодами от 2 до 6 лет, ~8 лет и ~14 лет. Показаны связи этих колебаний с Эль-Ниньо, Северо-Атлантическим колебанием и Северо-Атлантическим течением соответственно. Причем влияние Эль-Ниньо захватывает верхние 10 метров Балтийского моря, связь с Северо-Атлантическим колебанием прослеживается до глубины 52 метров, а влияние Северо-Атлантического течения сохраняется до глубины 78 метров. Показано, что найденные колебания оказали наиболее сильное влияние на температуру Балтийского моря с середины 1970-х по конец 1990-х гг. Обнаружена связь глобальных климатических сдвигов 1976/77 и 1998/99 гг. и междекадных изменений температуры Балтийского моря. Высказано предположение, что Глобальная атмосферная осцилляция выступает в роли синхронизирующего звена между Эль-Ниньо, Северо-Атлантическим колебанием и межгодовой изменчивостью температуры Балтийского моря.

Ключевые слова: изменения климата, температура, Балтийское море, Эль-Ниньо, Глобальная атмосферная осцилляция, Северо-Атлантическое колебание, Северо-Атлантическое течение.

I. V. Serykh¹, A. G. Kostianoy^{1,2}

¹ Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² S.Yu. Witte Moscow University, Moscow, Russia

ABOUT THE CLIMATIC CHANGES IN THE TEMPERATURE OF THE BALTIC SEA

Received 15.02.2019, in final form 27.05.2019

Analysis of the monthly average data of the temperature of the Baltic Sea on the surface and various depths showed its significant growth over the past decades. At the same time, the observed temperature increase is not evenly distributed throughout the Baltic Sea, as the temperature increased most strongly in the Gulf of Finland and Riga. Against this growth, temperature oscillations with periods ranging from 2 to 6 years, ~8 years and ~14 years were found. The relationships between these oscillations and the El Niño, the North Atlantic Oscillation and the North Atlantic Current, respectively, are shown. It was found that the influence of El Niño captures the top 10 meters of the Baltic Sea, the connection with the North Atlantic Oscillation is traced to a depth of 52 meters, and the influence of the North Atlantic Current is maintained to a depth of 78 meters. It has been shown that these fluctuations exerted the strongest influence on the temperature of the Baltic Sea from the mid-1970s to the end of the 1990s. The influence of global climate shifts 1976/77 and 1998/99 on inter-decadal changes in the temperature of the Baltic Sea has been detected. It has been suggested that the Global Atmospheric Oscillation acts as a synchronizing link between the El Niño, the North Atlantic Oscillation and the interannual variability of the temperature of the Baltic Sea.

Keywords: climate change, temperature, the Baltic Sea, El Niño, Global Atmospheric Oscillation, North Atlantic Oscillation, North Atlantic Current.

Ссылка для цитирования: Серых И.В., Костяной А.Г. О климатических изменениях температуры Балтийского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 3. С. 5–12

For citation: Serykh I.V., Kostianoy A.G. About the climatic changes in the temperature of the Baltic Sea. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 3, 5–12

DOI: 10.7868/S207366731903002X

Введение

Есть основания полагать, что изменения современного климата в существенной степени связаны с антропогенными факторами [1, 2]. Наряду с этим в данном процессе, несомненно, участвуют и естественные факторы, например, такие как перераспределение тепла между океанами и континентами [3], планетарные и региональные моды климатической изменчивости [4], а также изменение теплосодержания верхнего деятельного слоя океана [5].

Балтийское море является внутриконтинентальным мелководным, частично замерзающим морем бассейна Атлантического океана, которое омывает берега девяти стран. Несмотря на то, что России в Балтике принадлежит лишь небольшая часть акваторий в Финском заливе и в юго-восточной части моря (Калининградская область), региональные изменения климата и их последствия имеют большое значение для социально-экономического развития этих регионов России и стран Балтийского моря. Это связано с тем, что на водосборном бассейне моря проживает более 85 млн человек и происходит интенсификация хозяйственной деятельности: развитие судоходства, строительство портов, нефтяных терминалов, подводных газопроводов, гидротехнических сооружений, рыболовства, туризма. Все это делает весьма актуальным получение корректных оценок межгодовой изменчивости и цикличности различных гидрометеорологических параметров, определяющих наблюдаемые изменения климата на акватории Балтийского моря.

Согласно существующим оценкам, потеплением климата в Балтийском регионе обусловлено увеличение повторяемости стихийных бедствий, в том числе штормовых нагонов и катастрофических наводнений, а также аномальное цветение вод, с которыми все чаще сталкиваются жители прибрежных районов Балтийского моря [6]. Для минимизации ущерба и возможных негативных последствий изменения климата для населения и ведения хозяйственной деятельности странами Балтийского моря разрабатываются стратегии и планы адаптации морской деятельности, рекомендации по оптимизации деятельности и охране окружающей среды Балтийского моря, на основе реализации того или иного сценария климатических изменений [7].

В проведенных ранее оценках изменения климата в Балтийском регионе были показаны основные тенденции в отношении наблюдаемых в XX и в начале XXI вв. изменений ряда гидрометеорологических характеристик, таких как температура воздуха, количество осадков, скорость ветра, температура поверхности моря, соленость, продолжительность и площадь ледового покрытия в Балтийском море [7–10]. Однако целый ряд аспектов, связанных с проявлениями изменения климата в Балтийском море, и в особенности в его прибрежных зонах, остались без рассмотрения. Для восполнения данного пробела был выполнен анализ данных наблюдений по ряду гидрометеорологических характеристик для российской прибрежной части Финского залива и проведено сравнение с прибрежными районами юго-восточной Балтики [7–8, 11–12]. Получены оценки частоты встречаемости экстремальных значений индикаторов процесса эвтрофикации, включая температуру поверхности, в Финском заливе и Балтийском море в современный период и в будущем [13].

Цель данной работы – изучение сезонной и межгодовой изменчивости температуры Балтийского моря на различных глубинах за последние десятилетия, выявление наблюдаемой цикличности в изменчивости температуры моря и установлении взаимосвязей с Эль-Ниньо – Южным колебанием, Северо-Атлантическим колебанием и изменениями Северо-Атлантического течения.

Данные и методика их обработки

Анализировались среднемесячные данные температуры на поверхности и различных глубинах Мирового океана и Балтийского моря из следующих источников:

1) Среднемесячные данные температуры поверхности океана (ТПО) NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature v5 (ERSSTv5) на сетке $2 \times 2^\circ$ за период 1854–2017 гг. [14];

2) Среднемесячные данные температуры на 56 различных глубинах 0–700 м гидрофизического ре-анализа Балтийского моря Copernicus Marine Environment Monitoring Service's (CMEMS) Baltic Monitoring and Forecasting Centre (BAL MFC) BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011 на сетке 4×4 км за период 1993–2016 гг. [15].

Производилось осреднение данных для региона Балтийского моря (54 – 66° с.ш.; 13 – 30° в.д.) с учетом соответствующих масок суши из анализируемых источников. В каждом узле сетки рассчитывался средний сезонный ход за рассматриваемый период, который затем вычитался из исходных данных

для получения аномалий относительно сезонного хода. Линейные тренды рассчитывались методом наименьших квадратов. Поскольку этот метод очень чувствителен к краевым условиям, то производилось варьирование временных интервалов для проверки полученных значений линейного тренда. Для сглаживания и полосовой фильтрации применялся фильтр Баттерворта [16], а также скользящее осреднение. Спектры строились методом быстрого преобразования Фурье (БПФ).

По рассчитанным полям аномалий ТПО был построен Расширенный океанический индекс Эль-Ниньо (Extended Oceanic Niño Index – EONI) [17]. Он представляет собой скользящее трехмесячное сглаживание средних аномалий ТПО в районе (5° с.ш. – 5° ю.ш., 170° – 80° з.д.). В этом районе судовых метеорологических наблюдений намного больше, чем в районе, рассматриваемом при вычислении общепринятого для определения Эль-Ниньо индекса Niño 3.4 (5° с.ш.– 5° ю.ш., 170° – 120° з.д.).

Индекс Северо-Атлантического колебания, рассчитанный по методу основных компонент для аномалий атмосферного давления на уровне моря Северной Атлантики, был взят из NCAR Hurrell North Atlantic Oscillation Index (PC-based) [18]. Индекс Северо-Атлантического течения рассчитывался как разность между нормированными аномалиями ТПО между регионами (34° – 39° с.ш.; 58° – 48° в.д.) и (48° – 53° с.ш.; 35° – 25° в.д.).

Вейвлетное преобразование производилось с применением вейвлетной функции Морле [19]. Для вейвлетных кросс-корреляций двух рядов вычислялись произведения их вейвлетных вещественных компонент [20].

Полученные результаты

Анализ данных показал существенный рост температуры поверхности (ТП) Балтийского моря за последние десятилетия (рис. 1, см. вклейку), вызванный, по всей видимости, региональным потеплением климата. По данным BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011 средняя температура Балтийского моря на глубине 1.5 м за 1993–2016 гг. увеличивалась в среднем на 0.4°C за 10 лет (рис. 1), что подтверждается и по данным ERSSTv5 за различные промежутки времени. Так, по данным ERSSTv5 средняя температура поверхности моря этого региона за 1950–2017 гг. увеличивалась в среднем на 0.15°C за 10 лет. Рис. 1 показывает, что потепление Балтики происходит весьма неравномерно по акватории, так, например, крайняя восточная часть моря (Рижский и Финский заливы) нагреваются со скоростью более 0.6°C за 10 лет, а зона у юго-восточного побережья Швеции нагревается со скоростью около 0.2°C за 10 лет, что, вероятно, связано с усилением прибрежного апвеллинга в этом районе. За период 1993–2016 гг. средняя температура Балтийского моря увеличивалась на глубинах 10, 26, 52 и 78 м со скоростью 0.48, 0.39, 0.33 и 0.42°C за 10 лет соответственно.

Для среднемесячной температуры поверхности Балтийского моря характерен существенный сезонный ход, порядка 15°C – 20°C , который был исключен из дальнейшего рассмотрения. На фоне общего роста температуры наблюдается сильная межгодовая изменчивость ее аномалий относительно сезонного хода (рис. 2, см. вклейку). Так, например, средние аномалии температуры в теплые полугодия (май–октябрь) 2002 и 2006 гг. превышали $+2^{\circ}\text{C}$, а в теплое полугодие 1987 г. были отрицательными и превышали -2°C . Помимо отдельных аномально теплых и холодных полугодий наблюдаются аномалии продолжительностью более года. Так, например, 1985–1987 гг. были аномально холодными, после чего последовал резкий климатический сдвиг, отмеченный и в изменениях глобальной температуры воздуха [21].

График накопленной суммы аномалий температуры (после удаления линейного тренда) демонстрирует сильные междекадные изменения (рис. 2). Так, после относительно теплого периода 1950–1976 гг. последовал период отрицательных аномалий 1977–1987 гг., который сменился снова на теплый период. С 1999 г. наблюдается рост графика накопленной суммы. Отмеченные климатические сдвиги 1976/77 и 1998/99 гг. также имели глобальный характер [5, 22]. Это свидетельствует о влиянии планетарных мод климатической изменчивости на изменения аномалий температуры Балтийского моря. Расчет спектров и вейвлетных преобразований показал, что в межгодовой изменчивости температуры поверхности Балтийского моря выделяются колебания на периодах от 2 до 6 лет, ~ 8 лет и ~ 14 лет. (рис. 3 и 4, см. вклейку).

График оценки энергетического спектра аномалий температуры поверхности Балтийского моря имеет вид спектра красного шума на периодах от 2 месяцев до 2 лет (рис. 3). На 2-летнем периоде начинается плавный излом наклона графика спектральной плотности, и примерно до

периода 8 лет график постепенно меняет свой наклон до нулевого. Это свидетельствует о разграничении квази-2-летним периодом каскада энергии от межсезонных к межгодовым колебаниям. На периодах от 2 до примерно 8 лет наблюдается статистически значимый спектральный пик на периоде 2.4 г. Он хорошо известен как период квази-2-летнего колебания в тропиках, а также один из пиков на спектрах Эль-Ниньо—Южного колебания [23–24]. Также этот период может быть связан с удвоенным периодом чандлеровского колебания полюсов Земли, вызывающего полюсный прилив [25]. В работах [17, 26–28] показано, что Эль-Ниньо—Южное колебание есть элемент Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО), что объясняет связь столь отдаленных регионов, как тропики Тихого океана и Балтийское море.

Вторым формально статистически значимым является пик на квази-8-летнем периоде (рис. 3), характерным для Северо-Атлантического колебания [29]. Но из-за ограничения длины рассматриваемого ряда, это уже не отчетливо выраженный пик, а скорее полоса повышенной спектральной плотности, разграничивающая межгодовые и междекадные колебания.

Третьим формально статистически значимым является пик на периоде приблизительно 14 лет (рис. 3), после чего спектральная плотность начинает убывать, и спектральные оценки перестают быть надежными из-за ограниченной длины ряда наблюдений. Квази-14-летний период характерен для крупномасштабных изменений ТПО в регионе Северо-Атлантического течения [30].

Поскольку ряд средних аномалий температуры поверхности Балтийского моря является нестационарным, к нему уместно применить технику вейвлетного анализа (рис. 4). На картине вейвлетного преобразования хорошо видна нестационарность квази-2-летнего колебания. Однако его связь с Эль-Ниньо—Южным колебанием подтверждается присутствием наибольших энергий колебаний около 1997 г., когда наблюдалось сильнейшее событие Эль-Ниньо. Квази-8-летнее и квази-14-летнее колебания более стационарны, но и для них имеются периоды усиления и затухания. Так, в 1950–1960 гг. энергии этих колебаний достаточно низкие, что, впрочем, может быть объяснено малым количеством надежных данных наблюдений в этот период. В начале 1970-х гг. наблюдается усиление квази-8-летнего и квази-14-летнего колебаний, что может быть связано со сменой климатических сценариев в Северной Атлантике [3]. Так, согласно [3] с середины 1970-х по конец 1990-х гг. наблюдалось усиление влияния Северной Атлантики на Европейский климат. В начале же 2000-х гг. это влияние ослабло, что отражается и в вейвлет-диаграмме температуры поверхности Балтийского моря (рис. 4).

Рассмотрим отдельно каждое из отмеченных колебаний. Взаимосвязь между индексом Эль-Ниньо, рассчитанным как средние аномалии ТПО в районе (5° с.ш. — 5° ю.ш., 170° – 80° з.д.), и средними аномалиями температуры поверхности Балтийского моря отображена на рис. 5 (см. вклейку). На графиках рис. 5, а наблюдаются периоды синхронизации и рассинхронизации взаимосвязи этих двух параметров, когда их колебания происходят в фазе, противофазе и со сдвигом фазы вперед или назад. Это может быть связано с тем, что для Эль-Ниньо характерно не только квази-2-летнее колебание, которое является суб-гармоникой чандлеровского колебания полюсов Земли [23], но также колебания с более продолжительным периодом ~ 5.6 г. [24]. Как следует из кросс-вейвлет диаграммы рис. 5, б, для квази-2-летнего колебания характерны положительные связи с изменениями ТП Балтийского моря, а для колебаний с более продолжительным периодом ~ 5.6 г. — отрицательные связи. Это можно объяснить тем, что колебания с периодом ~ 2.4 г. более характерны для тропиков, а с периодом ~ 5.6 г. — для внетропических широт [24]. Также для колебания на периоде ~ 5.6 г. можно выделить годы с середины 1970-х гг. по конец 1990-х гг., когда его влияние прослеживалось особенно сильно, что может быть связано с усилением влияния Северной Атлантики на регион Балтийского моря [3, 5].

Эль-Ниньо—Южное колебание влияет на Северную Атлантику и тем самым — на Северо-Атлантическое колебание, которое, в свою очередь, оказывает непосредственное влияние на температуру Балтийского моря. В качестве синхронизирующего звена при этом выступает Глобальная атмосферная осцилляция (ГАО), чьими элементами являются и Южное и Северо-Атлантическое колебания [17]. Во время сильных событий Эль-Ниньо (положительная фаза ГАО), происходящих с периодичностью 5–6 лет, возникающие барические аномалии приводят к повышению атмосферного давления в регионе Исландского минимума и понижению в регионе Азорского максимума [17]. Это приводит к отрицательным значениям индекса Северо-Атлантического колебания и ослабляет характерный для этого

региона западно-восточный перенос тепла из Северной Атлантики в акваторию Балтийского моря, тем самым понижая его температуру.

Положительные связи индекса Северо-Атлантического колебания со средними аномалиями (относительно сезонного хода) температуры поверхности Балтийского моря хорошо прослеживаются на рис. 6 (см. вклейку). Очевидно, что с середины 1970-х гг. эти квази-8-летние колебания хорошо коррелированы и происходят в фазе.

То, что Южное и Северо-Атлантическое колебания являются элементами ГАО, следует также из кросс-вейвлетной диаграммы (рис. 6, б), где квази-2-летнее и квази-8-летнее колебания атмосферы над Северной Атлантикой находятся в фазе и имеют высокую связь с колебаниями ТП Балтийского моря. На этой диаграмме видны и сильные связи на квази-14-летнем периоде, характерном для распространения аномалий ТПО вдоль Северо-Атлантического течения (рис. 7, см. вклейку).

В работе [30] показано, что для изменений аномалий температуры Северо-Атлантического течения характерна квази-14-летняя периодичность, которая оказывает непосредственное влияние на климат Скандинавии. Из рис. 7 следует, что эти положительные связи справедливы также и для температуры поверхности Балтийского моря. Аномалии температуры верхнего слоя океана переносятся вдоль Северо-Атлантического течения с периодом ~ 14 лет. Достигая Британских островов и Северного моря, они оказывают непосредственное влияние на температуру Балтийского моря как посредством атмосферных потоков тепла, так и через затоки воды через Датские проливы.

Возникает вопрос: до каких глубин Балтийского моря прослеживаются обнаруженные связи с перечисленными выше модами климатической изменчивости? Положительная связь изменений температуры Балтийского моря с квази-2-летним колебанием Глобальной атмосферной осцилляции прослеживается только до глубины 10 м (рис. 8), поскольку этот сигнал передается в основном через атмосферу. На глубинах до 52 м сохраняется влияние квази-8-летнего и квази-14-летнего колебаний, поскольку они более продолжительные, а также могут передаваться из Северной Атлантики через Датские проливы (рис. 8, з). На глубине 78 м прослеживается влияние только наиболее инерционного квази-14-летнего колебания аномалий температуры океана, переносимых Северо-Атлантическим течением (рис. 8, д).

Заключение

Проведен анализ среднемесячных данных температуры Балтийского моря на поверхности и различных глубинах по re-анализам NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature v5 (ERSSTv5) и Copernicus Marine Environment Monitoring Service's (CMEMS) Baltic Monitoring and Forecasting Centre (BAL MFC) BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011. Анализ данных за 1950–2017 гг. показал существенный рост температуры поверхности Балтийского моря за последние десятилетия. Вместе с этим наблюдаемый рост температуры распределен по акватории Балтийского моря неравномерно. Наиболее сильно за последние десятилетия температура выросла в Финском и Рижском заливах.

На фоне этого роста обнаружены колебания температуры с квази-2-летним, квази-8-летним и квази-14-летним периодами. Показана связь этих изменений с Эль-Ниньо–Южным колебанием, Северо-Атлантическим колебанием и изменениями Северо-Атлантического течения соответственно. Обнаружено, что влияние Эль-Ниньо захватывает верхние 10 м Балтийского моря, связь с Северо-Атлантическим колебанием прослеживается до глубины 52 м, а влияние Северо-Атлантического течения сохраняется до глубины 78 м.

Выявлено влияние глобальных климатических сдвигов 1976/77 и 1998/99 гг. на междекадные изменения температуры Балтийского моря. Обнаружено, что указанные выше моды климатической изменчивости оказывали наиболее сильное влияние на температуру Балтийского моря с середины 1970-х по конец 1990-х гг.

Высказано предположение, что Глобальная атмосферная осцилляция выступает в роли синхронизирующего звена между Эль-Ниньо, Северо-Атлантическим колебанием и межгодовой изменчивостью температуры Балтийского моря.

Исследование выполнено при финансовой поддержке темы Госбюджета № 0149-2019-0004.

Литература

1. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to the IV Assessment Report of the IPCC / Eds. Solomon S. et al. Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2007. 996 p.
2. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to the V Assessment Report of the IPCC / Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013. 1535 p.
3. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О пространственной неоднородности некоторых параметров глобальной изменчивости современного климата // Доклады Академии наук. 2009. Т. 426, № 4. С. 543–548.
4. Dong B., Dai A. The influence of the interdecadal pacific oscillation on temperature and precipitation over the globe // Clim. Dyn. 2015. V. 45. P. 2667–2681.
5. Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content // Pure and Applied Geophysics. 2017. V. 174, N 7. P. 2863–2878.
6. BACC II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin / Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 2015. 515 p.
7. Еремина Т.Р., Бугров Л.Ю., Максимов А.А., Рябченко В.А., Шилин М.Б. Глава 5.2. Балтийское море // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва: Росгидромет, 2014. С. 615–643.
8. Еремина Т.Р., Густов Д.В., Цепелев В.Ю. Исследование долгопериодных изменений гидрометеорологических характеристик восточной части Финского залива в 1958–2009 гг. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6, № 1. С. 40–51.
9. Бедрицкий А.И., Мелешко В.П., Семенов С.М. и др. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Общее резюме. М.: Росгидромет, 2008. 29 с.
10. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А. Климатическая изменчивость ряда гидрометеорологических параметров морей России с 1979 по 2011 год // Труды ГГО. 2014. № 570. С. 50–87.
11. Dailidienė I., Baudler H., Chubarenko B., Navrotskaya S. Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the southern and eastern Baltic // Oceanologia. 2011. V. 53 (1-TI). P. 293–308.
12. Dailidienė I., Davulienė L., Kelpsaite L., Razinkovas-Baziukas A. Analysis of the climate change in Lithuanian coastal areas of the Baltic Sea // Journal of Coastal Research. 2012. V. 28, N3. P. 557–569.
13. Isaev A., Voloshchuk E., Ryabchenko V., Eremina T., Gordeeva S. Assessment of hazards in the Baltic Sea ecosystem in the future climate // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. V. 17(41). P. 359–366.
14. Huang B., Thorne P.W., Banzon V.F. et al. NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) // NOAA National Centers for Environmental Information. 2017. doi:10.7289/V5T72FNM
15. CMEMS-BAL-QUID-003-011. QUID for the Baltic Sea Physical Reanalysis BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011 // EU Copernicus Marine Service. 2018. Issue 1.1. 35 p.
16. Butterworth S. On the theory of filter amplifiers // Experimental Wireless and the Wireless Engineer. 1930. V. 7. P. 536–541.
17. Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections // Pure and Applied Geophysics. 2019. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02182-8>
18. Hurrell et al. The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact // Geophysical Monograph Series. 2003. 134. 279 p.
19. Torrence D.C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. V. 79. P. 61–78.
20. Torrence D.C., Webster P.J. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system // Journal of Climate. 1999. V. 12. P. 2679–2690.
21. Belolipetsky P., Bartsev S., Ivanova Y., Saltykov M. Hidden staircase signal in recent climate dynamic // Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences. 2015. V. 51. P. 323–330.
22. Hare S.R., Mantua N.J. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989 // Progress in Oceanography. 2000. V. 47 (2–4). P. 103–145.
23. Серых И.В., Сонечкин Д.М. О проявлениях движений полюсов Земли в ритмах Эль-Ниньо — Южного колебания // Доклады Академии наук. 2017. Т. 472, № 6. С. 716–719.
24. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin // Theoretical and Applied Climatology. 2019. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-02761-0>
25. Серых И.В., Сонечкин Д.М. О влиянии полюсного прилива на Эль-Ниньо // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 44–52.
26. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. Эль-Ниньо как следствие глобальной осцилляции в динамике климатической системы Земли // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446, № 1. С. 89–94.

27. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О влиянии событий Эль-Ниньо на климатические характеристики Индоокеанского региона // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 2. С. 165–175.
28. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В., Сонечкин Д.М. О статистической значимости и климатической роли Глобальной атмосферной осцилляции // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 2. С. 179–185.
29. Moron V., Vautard R., Ghil M. Trends, interdecadal and interannual oscillations in global sea-surface temperatures // *Clim. Dyn.* 1998. V. 14. P. 545–569.
30. Arthun M., Eldevik T., Viste E. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. 15875.

References

1. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to the IV Assessment Report of the IPCC / Eds. Solomon S. et al. Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2007. 996 p.
2. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to the V Assessment Report of the IPCC / Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013. 1535 p.
3. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. On the spatial nonuniformity of some parameters of global variations in the recent climate. *Doklady Earth Sciences*. 2009, 426, 4, 705–709.
4. Dong B., Dai A. The influence of the interdecadal pacific oscillation on temperature and precipitation over the globe. *Clim. Dyn.* 2015, 45, 2667–2681.
5. Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content. *Pure and Applied Geophysics*. 2017, 174, 7, 2863–2878.
6. BACC II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. *Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London*. 2015. 515 p.
7. Eremina T.R., Bugrov L. Yu., Maksimov A.A., Ryabchenko V.A., Shilin M.B. Chapter 5.2. Baltic Sea. *The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. Roshydromet, Moscow, 2014, 615–643 (in Russian).
8. Eremina T.R., Gustoev D.V., Tsepelev V.Yu. Study of Longterm Variability of Hydrometeorological Characteristics in the Eastern Part of the Gulf of Finland in 1958–2009. *Fundam. prikl. gidrofiz.* 2013, 6, 1, 40–51 (in Russian).
9. Bedriczkij A.I., Meleshko V.P., Semenov S.M. et al. Assessment report on climate change and its effects on the territory of the Russian Federation, General Summary. *M., Roshydromet*, 2008. 29 p. (in Russian).
10. Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lebedev S.A. Climatic variability of hydrometeorological parameters of the seas of Russia in 1979–2011 years. *Trudy Glavnoy Geofizicheskoy Observatorii*. 2014, 570, 50–87 (in Russian).
11. Dailidienė I., Baudler H., Chubarenko B., Navrotskaya S. Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the southern and eastern Baltic. *Oceanologia*. 2011, 53 (1-TI), 293–308.
12. Dailidienė I., Davulienė L., Kelpsaite L., Razinkovas-Baziukas A. Analysis of the climate change in Lithuanian coastal areas of the Baltic Sea. *Journal of Coastal Research*. 2012, 28, 3, 557–569.
13. Isaev A., Voloshchuk E., Ryabchenko V., Eremina T., Gordeeva S. Assessment of hazards in the Baltic Sea ecosystem in the future climate. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017, 17(41), 359–366.
14. Huang B., Thorne P.W., Banzon V.F. et al. NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST). *NOAA National Centers for Environmental Information*. 2017, doi:10.7289/V5T72FNM
15. CMEMS-BAL-QUID-003-011. QUID for the Baltic Sea Physical Reanalysis BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011. *EU Copernicus Marine Service*. 2018, 1.1, 35 p.
16. Butterworth S. On the theory of filter amplifiers. *Experimental Wireless and the Wireless Engineer*. 1930, 7, 536–541.
17. Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections. *Pure and Applied Geophysics*. 2019. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02182-8>
18. Hurrell et al. The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact. *Geophysical Monograph Series*. 2003, 134, 279 p.
19. Torrence D.C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998, 79, 61–78.
20. Torrence D.C., Webster P.J. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. *Journal of Climate*. 1999, 12, 2679–2690.
21. Belolipetsky P., Bartsev S., Ivanova Y., Saltykov M. Hidden staircase signal in recent climate dynamic. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2015, 51, 323–330.
22. Hare S.R., Mantua N.J. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography*. 2000, 47 (2–4), 103–145.

23. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Manifestations of motions of the Earth's pole in the El Niño-Southern Oscillation rhythms. *Doklady Earth Sciences*. 2017, 472, 2, 256–259.
24. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin. *Theoretical and Applied Climatology*. 2019. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-02761-0>
25. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Confirmation of the oceanic pole tide influence on El Niño. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016, 13, 2, 44–52 (in Russian).
26. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. El Niño as a consequence of the global oscillation in the dynamics of the earth's climatic system. *Doklady Earth Sciences*. 2012, 446, 1, 1089–1094.
27. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Y.A., Serykh I.V. On El Niño's impact upon the climate characteristics of the Indian monsoon. *Oceanology*. 2012, 52, 2, 147–156.
28. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Y.A., Serykh I.V., Sonechkin D.M. Statistical significance and climatic role of the Global Atmospheric Oscillation. *Oceanology*. 2016, 56, 2, 165–171.
29. Moron V., Vautard R., Ghil M. Trends, interdecadal and interannual oscillations in global sea-surface temperatures. *Clim. Dyn.* 1998, 14, 545–569.
30. Arthun M., Eldevik T., Viste E. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean. *Nat. Commun.* 2017, 8, 15875.

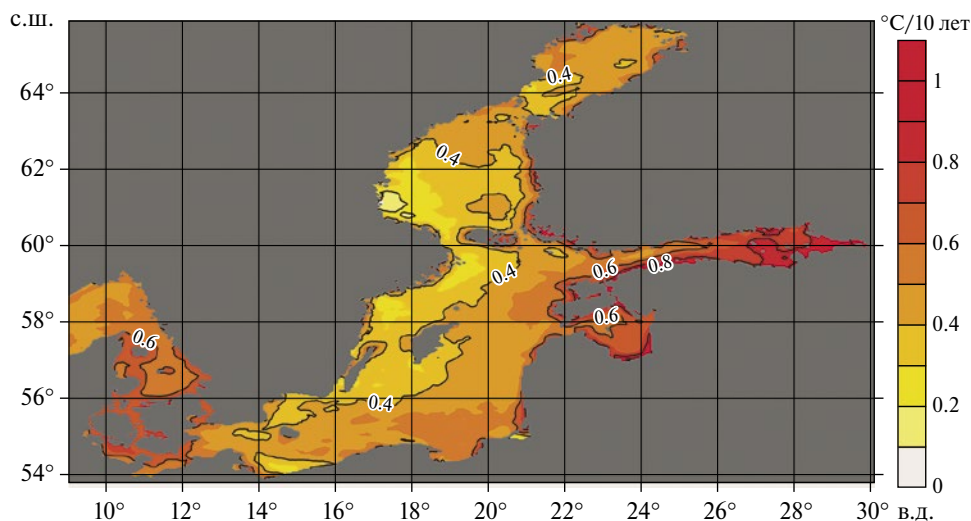


Рис. 1. Поле средних изменений температуры Балтийского моря на глубине 1.5 м ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) рассчитанное по линейным трендам среднемесячных аномалий (относительно сезонного хода), полученных по данным BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011 за 1993–2016 гг.

Fig. 1. The field of average changes in the temperature of the Baltic Sea at a depth of 1.5 meters ($^{\circ}\text{C}$ for 10 years) calculated from linear trends of average monthly anomalies (relative to the seasonal signal) obtained according to BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011 data for 1993–2016.

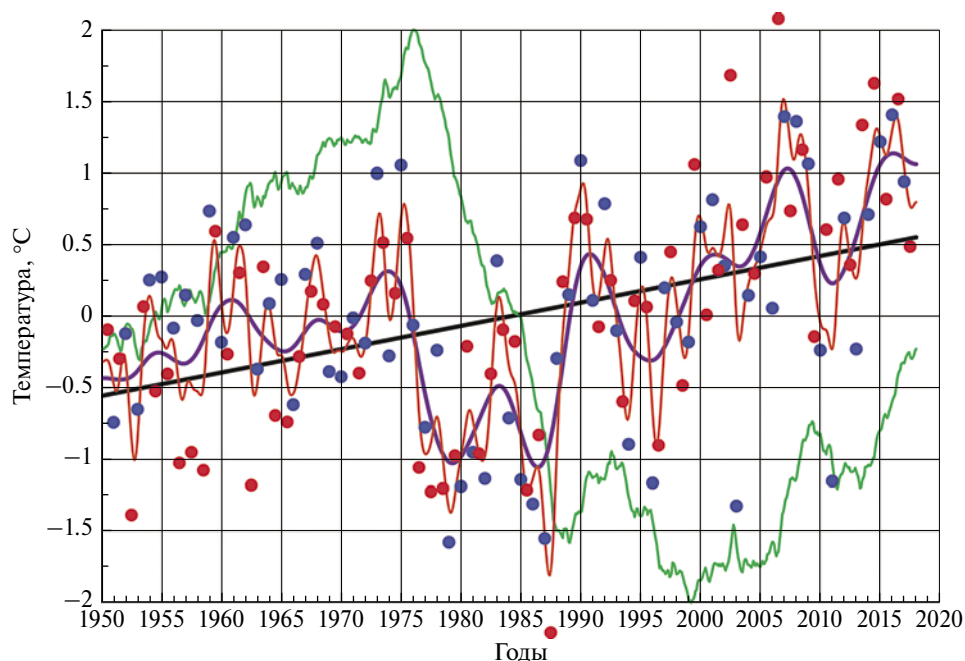


Рис. 2. Изменения средних аномалий температуры поверхности Балтийского моря сглаженных 2-летним (оранжевый) и 7-летним (фиолетовый) фильтрами Баттерворта нижних частот. На графике показаны их линейный тренд (черный) и накопленная сумма аномалий после удаления линейного тренда (зеленый). Кругами отмечены средние значения аномалий для теплого (май–октябрь) (красный) и холодного (ноябрь–апрель) (синий) полугодий. Использованы среднемесячные данные ERSSTv5 за 1950–2017 гг.

Fig. 2. Changes in the mean temperature anomalies of the Baltic Sea surface temperature smoothed by 2-year (orange) and 7-year (purple) Butterworth low-pass filters. The graph shows their linear trend (black) and the accumulated sum of anomalies after the removal of the linear trend (green). Circles mark average values of anomalies for the warm (May–October) (red) and cold (November–April) (blue) half-years. Monthly average ERSSTv5 data for 1950–2017 were used.

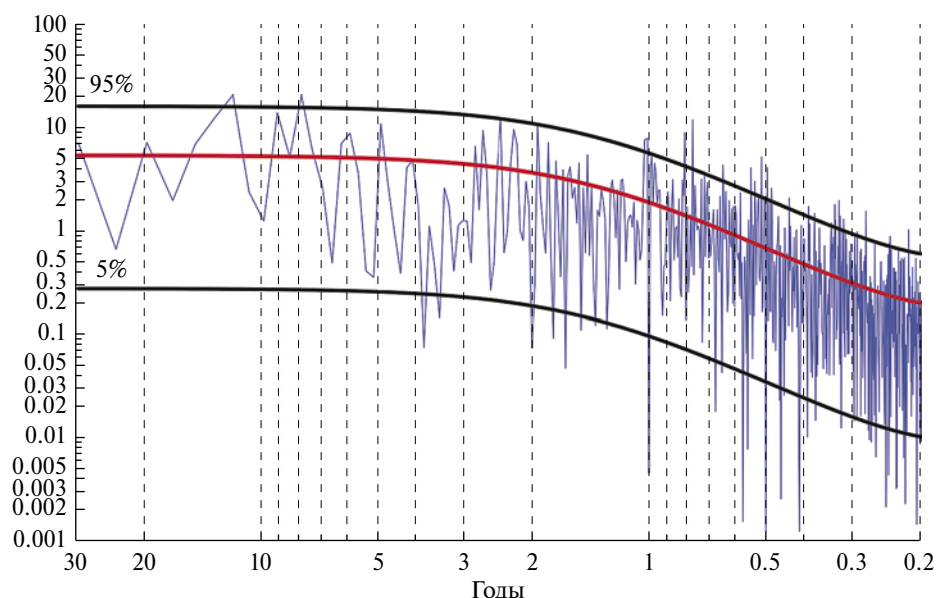


Рис. 3. Энергетический спектр ряда средних аномалий температуры поверхности Балтийского моря, рассчитанный по среднемесячным данным ERSSTv5 за период 1900–2017 гг. (синий). Отмечен доверительный интервал от 5% (черная линия внизу) до 95% (черная линия сверху) и спектр красного шума (красная линия между ними). Произведено предварительное нормирование ряда на его среднеквадратическое отклонение.

Fig. 3. The energy spectrum of average anomalies of the Baltic Sea surface temperature, calculated from the monthly average ERSSTv5 data for the period 1950–2017 (blue). The confidence interval of 5% (black line below), 95% (black line above) and the spectrum of red noise (red line between them) are shown. Data were preliminary normalized on its standard deviation.

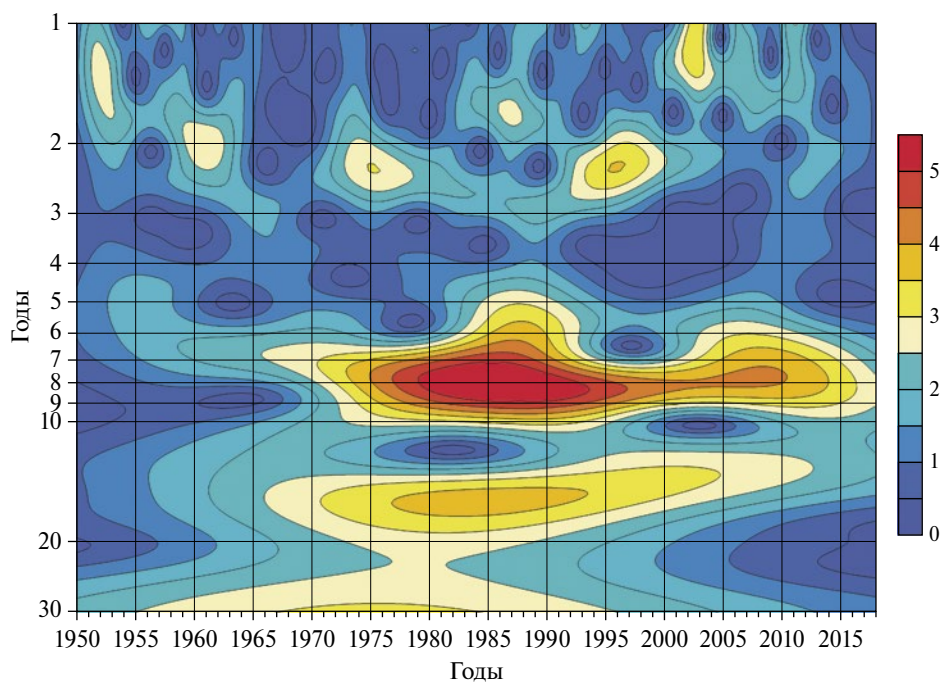


Рис. 4. Картина вейвлетного преобразования ряда средних аномалий температуры поверхности Балтийского моря по среднемесячным данным ERSSTv5 за 1950–2017 гг. Произведено предварительное нормирование ряда на его среднеквадратическое отклонение.

Fig. 4. Diagram of wavelet transformation of a number of average anomalies of the Baltic Sea surface temperature according to monthly average ERSSTv5 data for 1950–2017. Data were preliminary normalized on its standard deviation.

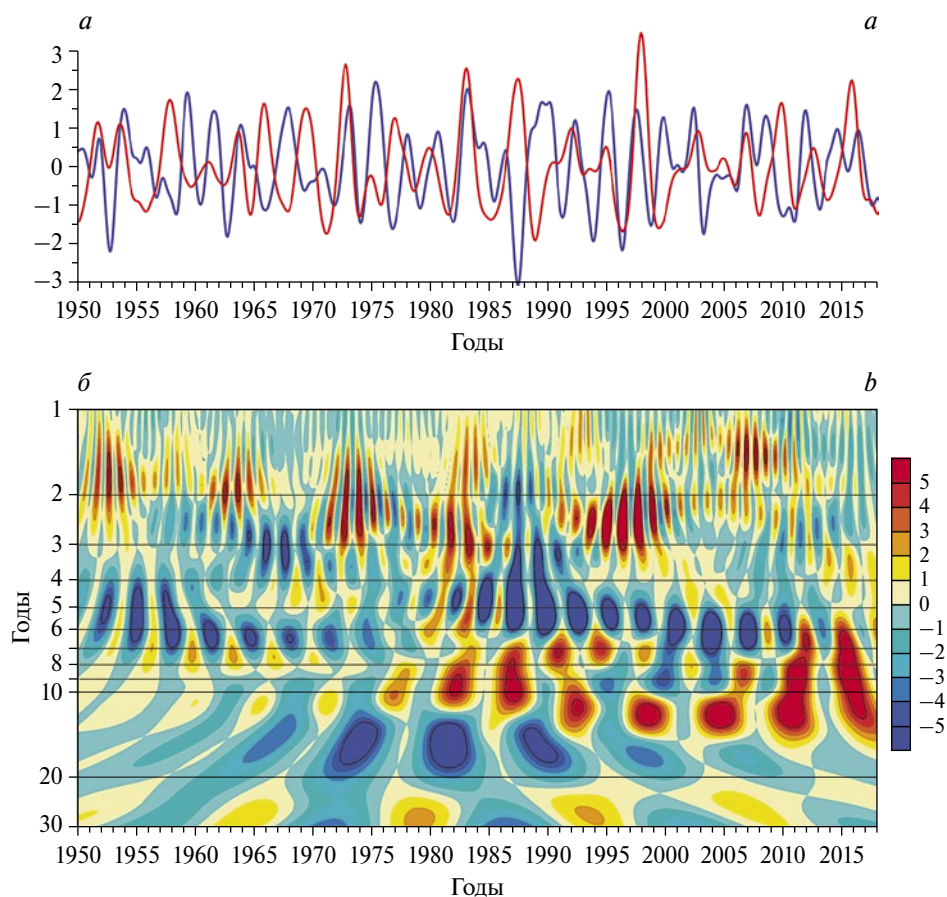


Рис. 5. Ряды индекса Эль-Ниньо (красный) и средних аномалий температуры поверхности Балтийского моря (синий) после применения полосового фильтра Баттерворта от 2 до 6 лет (а), и картина кросс-корреляций их вещественных преобразований без фильтрации (б), рассчитанные по среднемесячным данным ERSSTv5 за 1950–2017 гг. Было произведено предварительное удаление линейных трендов, центрирование и нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения.

Fig. 5. Time series of the El Niño index (red) and medium temperature anomalies of the Baltic Sea surface (blue) after applying the Butterworth bandpass filter from 2 to 6 years (a), and the cross-correlation diagram of their real transformations without filtering (b), calculated by average monthly ERSSTv5 data for 1950–2017. A preliminary removal of linear trends was made, and the series were centered and normalized on their standard deviations.

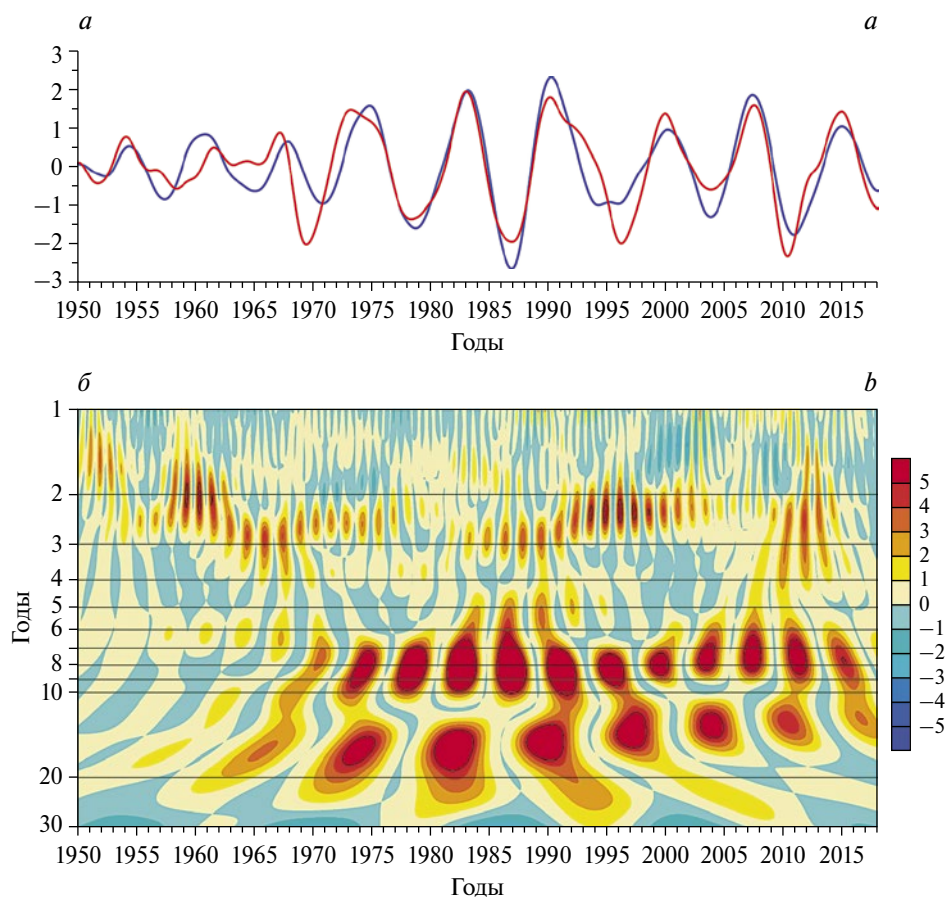


Рис. 6. Ряды индекса Северо-Атлантического колебания (красный), рассчитанного по методу главных компонент для аномалий атмосферного давления на уровне моря Северной Атлантики, и средних аномалий температуры поверхности Балтийского моря (синий) после применения полосового фильтра Баттерворта от 7 до 9 лет (а), и картина кросс-корреляций их вещественных преобразований без фильтрации (б), рассчитанные по среднемесячным данным ERSSTv5 за 1950–2017 гг. Было произведено предварительное удаление линейных трендов, центрирование и нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения.

Fig. 6. Time series of the North Atlantic Oscillation Index (red), calculated using the principal component method for atmospheric pressure anomalies at sea level in the North Atlantic, and average temperature anomalies of the Baltic Sea surface (blue) after applying Butterworth bandpass filter from 7 to 9 years (a), and the cross-correlation diagram of their real transformations without filtering (b), calculated on the basis of average monthly ERSSTv5 data for 1950–2017.

A preliminary removal of linear trends was made, and the series were centered and normalized on their standard deviations.

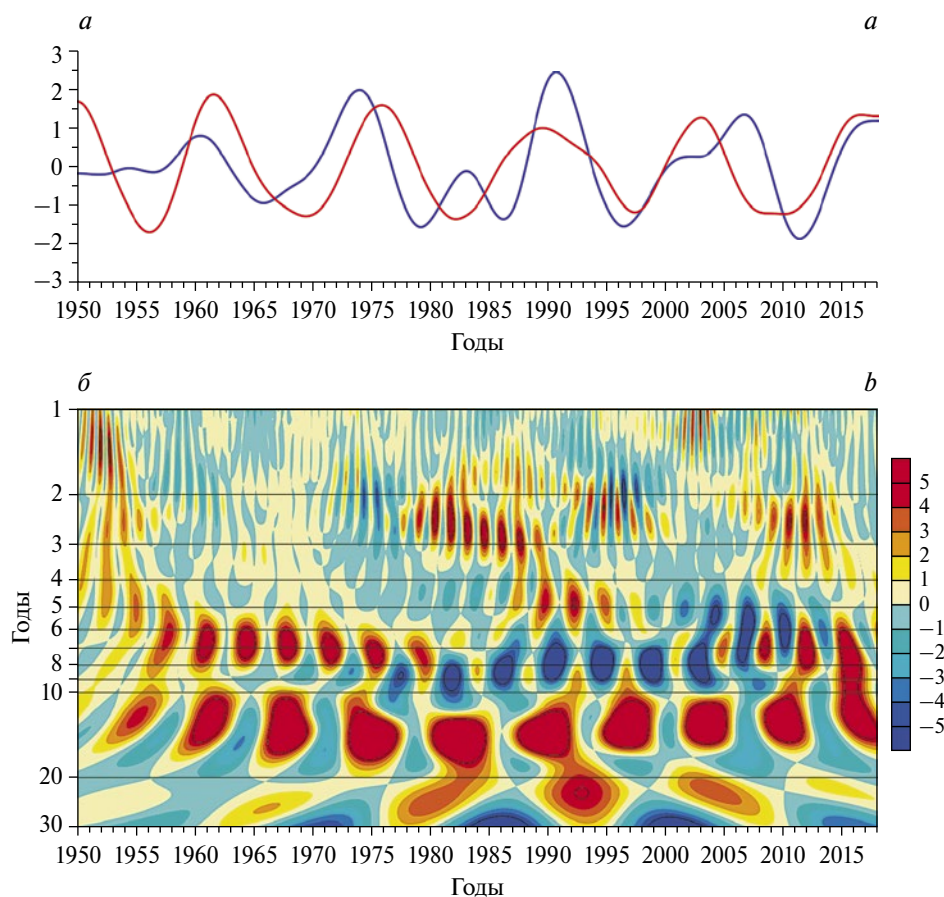


Рис. 7. Ряды индекса Северо-Атлантического течения (красный), рассчитанного как разность между нормированными аномалиями температуры поверхности океана между регионами (34–39° с.ш.; 58–48° в.д.) и (48–53° с.ш.; 35–25° в.д.), и средних аномалий температуры поверхности Балтийского моря (синий) после применения полосового фильтра Баттерворта от 13 до 15 лет (а), и картина кросс-корреляций их вещественных преобразований без фильтрации (б), рассчитанные по среднемесячным данным ERSSTv5 за 1950–2017 гг. Было произведено предварительное удаление линейных трендов, центрирование и нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения.

Fig. 7. Time series of the North Atlantic Current Index (red), calculated as the difference between the normalized anomalies of the ocean surface temperature between the regions (34–39° N; 58–48° W) and (48–53° N; 35–25° W), and the mean surface temperature anomalies of the Baltic Sea (blue) after applying a Butterworth bandpass filter from 13 to 15 years (a), and a cross-correlation diagram of their real transformations without filtering (b) calculated from the average ERSSTv5 data for 1950–2017. A preliminary removal of linear trends was made, and the series were centered and normalized on their standard deviations.

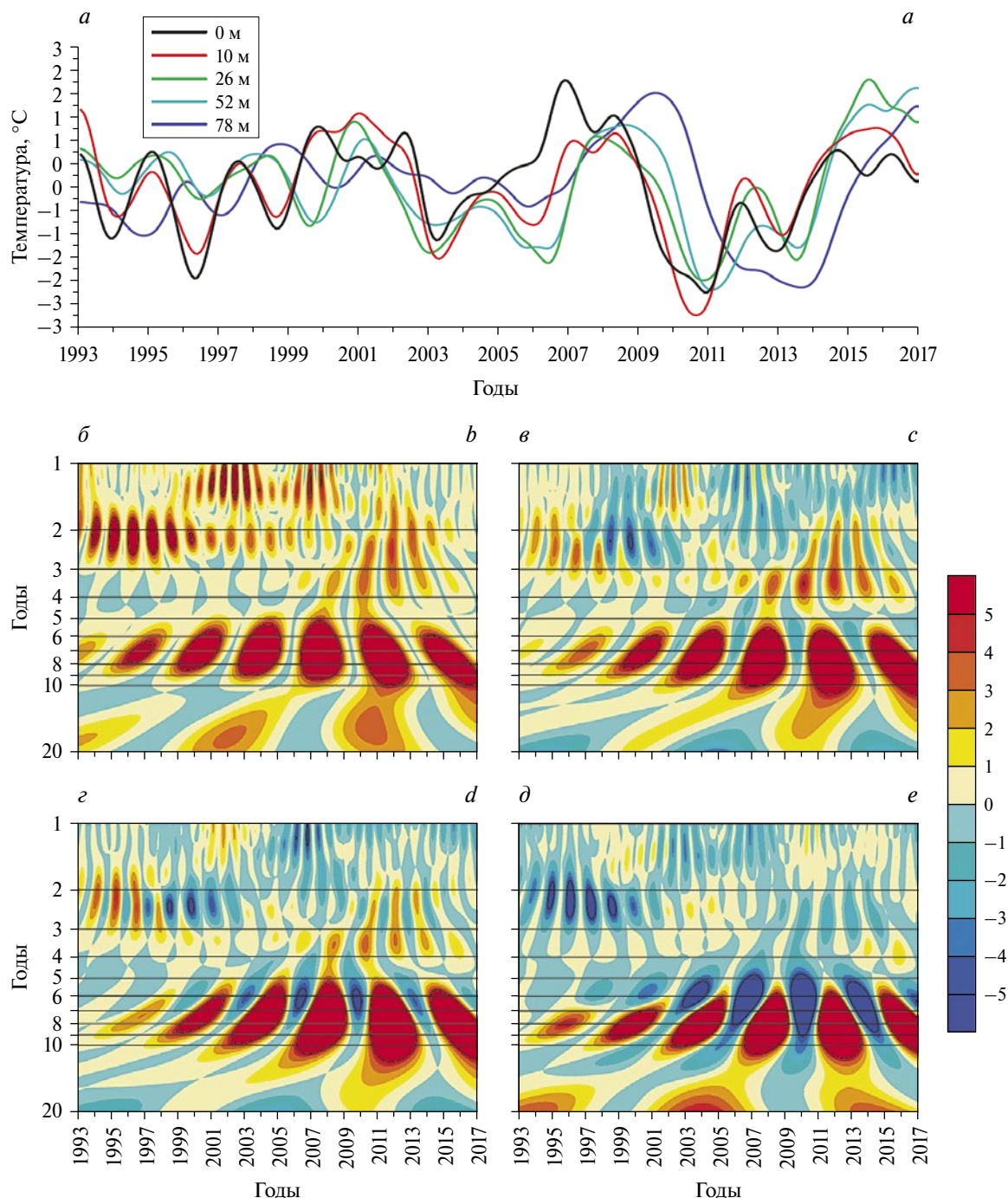


Рис. 8. Ряды средних аномалий температуры на глубинах 0, 10, 26, 52 и 78 м после применения 2-летнего фильтра Баттерворта нижних частот, рассчитанные по среднемесячным данным ERSSTv5 (для 0 м) и BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011 (для глубин) за 1993–2016 (*a*); и картина кросс-корреляций вещественных преобразований этих рядов (без фильтрации) на глубинах 10 (*b*), 26 (*c*), 52 (*d*) и 78 (*e*) м, со средними аномалиями температуры поверхности этого же региона, после предварительного удаления линейных трендов, центрирования и нормирования рядов на их среднеквадратические отклонения (*b–e*).

Fig. 8. Time series of average temperature anomalies at depths of 0, 10, 26, 52 and 78 meters after applying the 2-year Butterworth low-pass filter, calculated from the monthly ERSSTv5 data (for 0 meters) and BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011 data (for deeper layers) for 1993–2016 (*a*); and cross-correlation diagrams of real transformations of these series (without filtering) at depths of 10 (*b*), 26 (*c*), 52 (*d*) and 78 (*e*) meters, with average surface temperature anomalies of the same region, after preliminary removal of linear trends, centering and normalizing the series on their standard deviations (*b–e*).