

УДК 551.465

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОД В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА ПО ДАННЫМ ОКЕАНСКИХ РЕАНАЛИЗОВ

© 2024 г. П. А. Сухонос^{1,*}, В. В. Иванов², Н. А. Дианский^{2,3,4}

Представлено академиком РАН С.А. Добролюбовым 20.11.2023 г.

Поступило 20.11.2023 г.

После доработки 05.12.2023 г.

Принято к публикации 14.12.2023 г.

Приводятся результаты оценки долгопериодных изменений температуры вод в северной части Атлантического океана (0° – 70° с.ш., 8° – 80° з.д.) по данным океанских реанализов и объективных анализов за периоды 1961–2011 гг. и 1980–2011 гг. Полученные оценки основаны на применении непараметрического метода регрессионного анализа (квантильной регрессии) к среднемесячной температуре океана для значения квантиля 0.5. В период 1961–2011 гг. потепление, в основном, отмечалось в верхнем 400-метровом слое в области от экватора до 70° с.ш. За этот 51-летний период рост медианы среднемесячной температуры океана составил в среднем по анализируемой акватории $\sim 0.5^{\circ}\text{C}$, а в системе Гольфстрим–Северо-Атлантическое течение $\sim 1^{\circ}\text{C}$. В период 1980–2011 гг. потепление в северной части Атлантического океана, в основном, происходило в верхнем 1-км слое в высоких широтах (50° – 65° с.ш.). За этот 32-летний период рост медианы среднемесячной температуры океана в субполярном круговороте в верхнем 400-метровом слое составил $\sim 1^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: температура, реанализ океана, квантильная регрессия, северная часть Атлантического океана

DOI: 10.31857/S2686739724040145

ВВЕДЕНИЕ

Современный рост температуры вод Мирового океана приводит к дестабилизации глобальной климатической системы. Основными последствиями этого являются таяние льдов, повышение уровня океана, рост частоты экстремальных погодных явлений и др. [1]. Модельные и натурные оценки показывают, что глобальное потепление и связанные с ним изменения ключевых параметров климата будут усиливаться в будущем. Изменчивость состояния океана и его циркуляции играют важную роль в перераспределении глобальной тепловой энергии. Однако в настоящее время это утверждение все

еще недостаточно обосновано, особенно на количественном уровне, из-за недостатка данных о характеристиках в глубоких слоях океана. Возможности достоверной реконструкции долгопериодных изменений температуры океана резко ограничены существенной неоднородностью данных наблюдений, особенно в глубинных слоях. В связи с этим получение реалистичной картины эволюции температуры Мирового океана и его отдельных регионов за длительный период крайне необходимо для понимания причин современных изменений климата.

В связи с растущими опасениями по поводу неблагоприятных последствий изменения климата и значительной роли океанов в аккумуляции избыточного тепла и поглощении основного парникового газа (CO_2) из атмосферы были предприняты значительные усилия для изучения вариаций термического состояния океанов [2]. За последние десятилетия тепло в основном аккумулируется в верхних слоях океана (верхние 700 м), хотя около 30% накопленного тепла находится в промежуточных слоях между 700 и 2000 м [3, 4]. Результаты многочисленных исследований

¹Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука, Москва, Россия

⁴Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия

*E-mail: pasukhonis@mail.ru

показали, что наблюдаемое изменение температуры Мирового океана характеризуется долгосрочными трендами, вызванными, в основном, деятельностью человека, и периодической и аperiodической изменчивостью, обусловленной до конца не изученными естественными факторами. Оценки темпа потепления Мирового океана за несколько десятилетий находятся в диапазоне $0.08\text{--}0.10^\circ\text{C}/10$ лет в верхнем 300-метровом слое [5]. При этом в связи с различной длительностью анализируемых временных рядов скорость роста температуры океана может сильно отличаться.

Наблюдаемое потепление океана происходит неравномерно во времени. Тенденция потепления, обнаруженная в слое 0–2000 м в северной части Атлантического океана ($0^\circ\text{--}80^\circ$ с.ш.), составляет $0.031 \pm 0.006^\circ\text{C}/10$ лет в период 1920–2002 гг. ($0.043 \pm 0.011^\circ\text{C}/10$ лет в период 1950–2002 гг.) [6]. Однако в XX веке наблюдались периоды, в которых краткосрочные тренды сильно усиливались за счет мультideкадной изменчивости [7]. На долю последней в северной части Атлантического океана приходится $\sim 60\%$ общего потепления с 1970 года. Тренд, обусловленный внутренней мультideкадной изменчивостью океана, не способствует формированию долгопериодных тенденций, но он может внести существенный вклад в короткопериодные тенденции. Долгопериодный тренд усредненной по акватории температуры поверхности океана (ТПО) в период 1946–2008 гг. составляет $0.090 \pm 0.013^\circ\text{C}/10$ лет, в то время как тренд в период 1977–2008 гг. равен $0.145 \pm 0.029^\circ\text{C}/10$ лет [8].

Опубликованные оценки климатических трендов температуры северной части Атлантического океана, полученные по данным различной длительности из разных источников и в большинстве своем приуроченные к поверхности океана, имеют рассогласования, и их сложно интерпретировать. Это приводит к неопределенности в структуре и величине долгопериодного изменения температуры океана. Цель данной работы — получить уточненную количественную оценку изменения температуры вод в северной части Атлантического океана на основании нескольких массивов данных за многолетний период. Особый акцент в данном исследовании сделан на анализе медианных трендов. Это представляется целесообразным в отношении временных рядов с нестационарной статистической структурой, обусловленной ростом количества наблюдений и наложением процессов естественного и антропогенного происхождения

во второй половине XX века. В работе используется термин “долгопериодное изменение температуры океана” без разделения на антропогенное изменение температуры океана и естественные (более длительные, чем мультideкадные) вариации температуры океана, которые не разрешаются используемыми массивами данных.

ДАННЫЕ И МЕТОД ИХ ОБРАБОТКИ

Использованы среднемесячные данные о температуре океана из массивов объективного анализа океана EN.4.2.2 (1945–2020 гг.) [9] и ISHII (1945–2012 гг.) [10] и массивов реанализа океана, включая: GECCO3 версия 3S6m (1948–2018 гг.) [11], ORAS4 (1958–2014 гг.) [12], GFDL (1961–2015 гг.) [13], ORA-S3 (1959–2011 гг.) [14], ORAS5 (1979–2018 гг.) [15], GODAS (1980–2021 гг.) [16], SODA версия 3.12.2 (1980–2017 гг.) [17]. Исследуемый регион ограничен координатами $0^\circ\text{--}70^\circ$ с.ш., $8^\circ\text{--}80^\circ$ з.д.

В качестве количественного показателя долгопериодного изменения температуры океана использованы оценки линейных трендов медианных значений этой характеристики. Квантильная регрессия представляет собой процедуру оценки параметров регрессии (чаще всего линейной) для любого из квантилей интервала от 0 до 1 значений зависимой переменной. Преимущества квантильного регрессионного анализа по сравнению с другими методами обсуждаются в [18, 19].

Известно, что для случайной переменной Y с функцией распределения вероятности $F(y) = \text{Prob}(Y \leq y)$ τ -й квантиль определяется как обратная функция $Q(\tau) = \inf\{y: F(y) \geq \tau\}$, где $0 < \tau < 1$. В частности медиана представляет собой $Q(1/2)$.

Идея использования метода квантильной регрессии для линейной модели подразумевает, что для произвольного значения квантиля $0 < \tau < 1$ можно ввести понятие линейной условной функции $Q(\tau|X=x) = x\beta(\tau)$ для любого значения $\tau \in (0, 1)$. Нахождение этой функции осуществляется путем решения оптимизационной задачи:

$$\beta(\tau) = \underset{\beta}{\operatorname{argmin}} \left[\sum_{i: y_i \geq x_i \beta} \tau |y_i - x_i \beta| + \sum_{i: y_i < x_i \beta} (1 - \tau) |y_i - x_i \beta| \right]. \quad (1)$$

Здесь y_i и x'_i — заданные значения зависимой и независимой переменных в i -том узле сетки, соответственно.

Определить значение $\beta(\tau)$, называемое коэффициентом линейной квантильной регрессии, соответствующее некоторому значению τ , в аналитическом виде нельзя, но возможно методом линейного программирования. В частном случае при $\tau = 1/2$ минимизация (1) сводится к поиску β , являющегося решением оптимизационной задачи $\beta(1/2) = \argmin \sum_{i=1}^n |y_i - x_i \beta|$, то есть минимизируется сумма абсолютных отклонений, что соответствует регрессии на основе медианы абсолютных отклонений.

Определение стандартных ошибок коэффициентов квантильной регрессии выполнено методом бутстреп [18], на основе которого могут быть получены наиболее реалистичные оценки значимости линейных трендов [20]. Методом случайных испытаний генерировались 1000 подвыборок, каждая из которых представляла временной ряд, в котором, по сравнению с исходным временным рядом, отсутствовали случайным образом исключенные значения (~30% значений исключались из временного ряда). По каждой из выборок вычислялись тренды по методу квантильной регрессии для квантиля $\tau = 1/2$. Оценка значимости коэффициентов тренда выбиралась на уровне доверия $\alpha = 0.05$. Представлены только статистически значимые результаты.

Расчеты проводились для каждого массива данных в каждом узле сетки на всех горизонтах от поверхности до дна за временные интервалы: 1961–2011 гг. и 1980–2011 гг. Первый интервал – общий период для наибольшего числа массивов данных. Второй интервал выбран потому, что именно с ~1980 г. наблюдался быстрый рост глобальной ТПО, обусловленный совпадением антропогенного тренда и естественной мультидекадной изменчивости. Затем коэффициенты линейных трендов температуры океана усреднялись зонально и в слое 10–400 м. Нижняя граница указанного слоя выбрана по результатам анализа среднезональных трендов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Среднезональные тренды температуры северной части Атлантического океана за период 1961–2011 гг. в верхнем 400-метровом слое в области от экватора до 70° с.ш., в основном, положительны. Коэффициенты квантильного тренда превышают 0.1°C/10 лет. Выделяются две области наибольшего потепления. Одна область расположена в Тропической Атлантике (0°–10° с.ш.) на глубине около 100 м с величинами

коэффициентов квантильного тренда более 0.25°C/10 лет. Эта область слабо выражена по ISHII и GFDL. Другая область расположена в окрестности 40° с.ш. в слое 10–200 м с величинами коэффициентов квантильного тренда более 0.2°C/10 лет. По GECCO3, ORAS4 и ORAS3 среднезональные квантильные тренды температуры океана отрицательны в нескольких областях (с коэффициентами менее –0.1°C/10 лет). Однако поскольку эти области регистрируются только для половины из анализируемых массивов данных и расположены в разных местах, то общую закономерность похолодания океана выделить не удастся.

За период 1961–2011 гг. долгопериодные тенденции изменения температуры северной части Атлантического океана в слое 10–400 м демонстрируют положительные коэффициенты квантильного тренда (более 0.1°C/10 лет) почти на всей акватории (рис. 1). Пространственное распределение областей с высокими коэффициентами квантильных трендов незначительно различается. В окрестности Межпассатного противотечения и Гвианского течения по всем массивам данных отмечаются положительные коэффициенты квантильного тренда (более 0.1°C/10 лет). В окрестности Межпассатного противотечения по GECCO3, ORAS4 и ORAS3 величина этих коэффициентов более 0.2°C/10 лет. В окрестности Гвианского течения по ORAS4 величина этих коэффициентов более 0.2°C/10 лет, а по GFDL – более 0.5°C/10 лет. В области Канарского апвеллинга обнаружены положительные коэффициенты квантильного тренда с величинами более 0.2°C/10 лет по всем массивам данных, за исключением ORAS4 и ISHII. По ORAS4 рост температуры незначим, а по ISHII коэффициенты квантильного тренда положительны, но имеют величины менее 0.2°C/10 лет. В Тропической Атлантике значимые отрицательные коэффициенты квантильного тренда (менее –0.1°C/10 лет) отмечаются на 10° с.ш. только по GFDL. В системе Гольфстрим–Северо-Атлантическое течение все используемые массивы данных отмечают потепление слоя 10–400 м (с коэффициентами более 0.2°C/10 лет). По данным всех реанализов океана (но не объективных анализов океана), в этом регионе отмечаются области с коэффициентами квантильного тренда более 0.5°C/10 лет. Однако расположение этих областей различается. Наиболее противоречивые оценки коэффициентов квантильного тренда получены для субполярного круговорота. В целом почти все массивы данных показывают небольшие

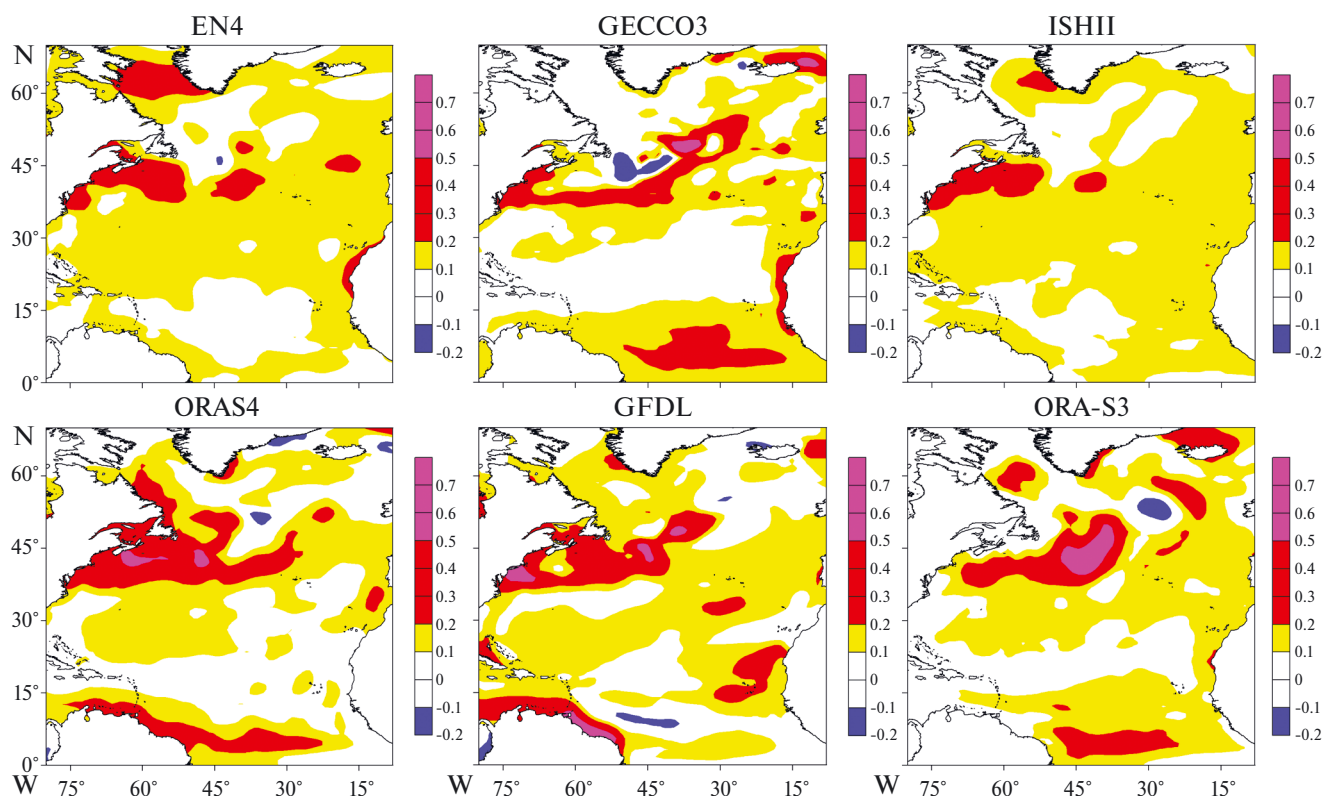


Рис. 1. Коэффициенты медианного тренда температуры вод в северной части Атлантического океана ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за период 1961–2011 гг., усредненные в слое 10–400 м.

области похолодания (с коэффициентами менее $-0.1^{\circ}\text{C}/10$ лет), но их положение в пространстве различается. По GFDL и ORA-S3 эти области расположены в окрестности 50° с.ш., 30° з.д., а по остальным массивам данных — юго-восточнее. В Восточно-Гренландском течении долго-периодные тенденции изменения температуры океана в слое 10–400 м по GECCO3 и ORAS4 статистически значимы (коэффициенты медианного тренда по абсолютной величине превышают $0.1^{\circ}\text{C}/10$ лет), но разнонаправлены.

Среднезональные тренды температуры северной части Атлантического океана в период 1980–2011 гг. преимущественно положительны. Выделяется общая для всех массивов данных область потепления с коэффициентами квантильного тренда более $0.3^{\circ}\text{C}/10$ лет в верхнем 400-метровом слое в полосе широт 50° – 65° с.ш. Толщина слоя с коэффициентами квантильного тренда более $0.2^{\circ}\text{C}/10$ лет увеличивается от экватора к 65° с.ш. Исключение составляют среднезональные тренды по GECCO3 и GODAS на 40° с.ш., где получены околонулевые коэффициенты медианных трендов. По данным всех реанализов, кроме GFDL, обнаружены области с отрицательными

значениями среднезональных трендов температуры океана (менее $-0.1^{\circ}\text{C}/10$ лет). В Тропической Атлантике (0° – 25° с.ш.) в рассматриваемый временной период в слое 100–150 м выделяется общая для большинства массивов данных область с похолоданием.

За период 1980–2011 гг. временные ряды температуры вод северной части Атлантического океана в слое 10–400 м демонстрируют положительные коэффициенты медианного тренда (более $0.2^{\circ}\text{C}/10$ лет) к северу от 30° с.ш. (рис. 2). Исключение составляют центральная (по ORAS5) и западная (по GODAS) части субполярного круговорота. Область похолодания в слое 100–150 м в Тропической Атлантике не видна на рис. 2 из-за осреднения коэффициентов тренда в большом слое. Она остается различимой только по GODAS и SODA3. Положительные коэффициенты медианного тренда в слое 10–400 м в Гвианском течении обнаружены по ORAS5 и GFDL. Потепление в этом течении с интенсивностью более $0.6^{\circ}\text{C}/10$ лет получено только по GFDL.

В системе Гольфстрим–Северо-Атлантическое течение за период 1980–2011 гг. отмечается большой

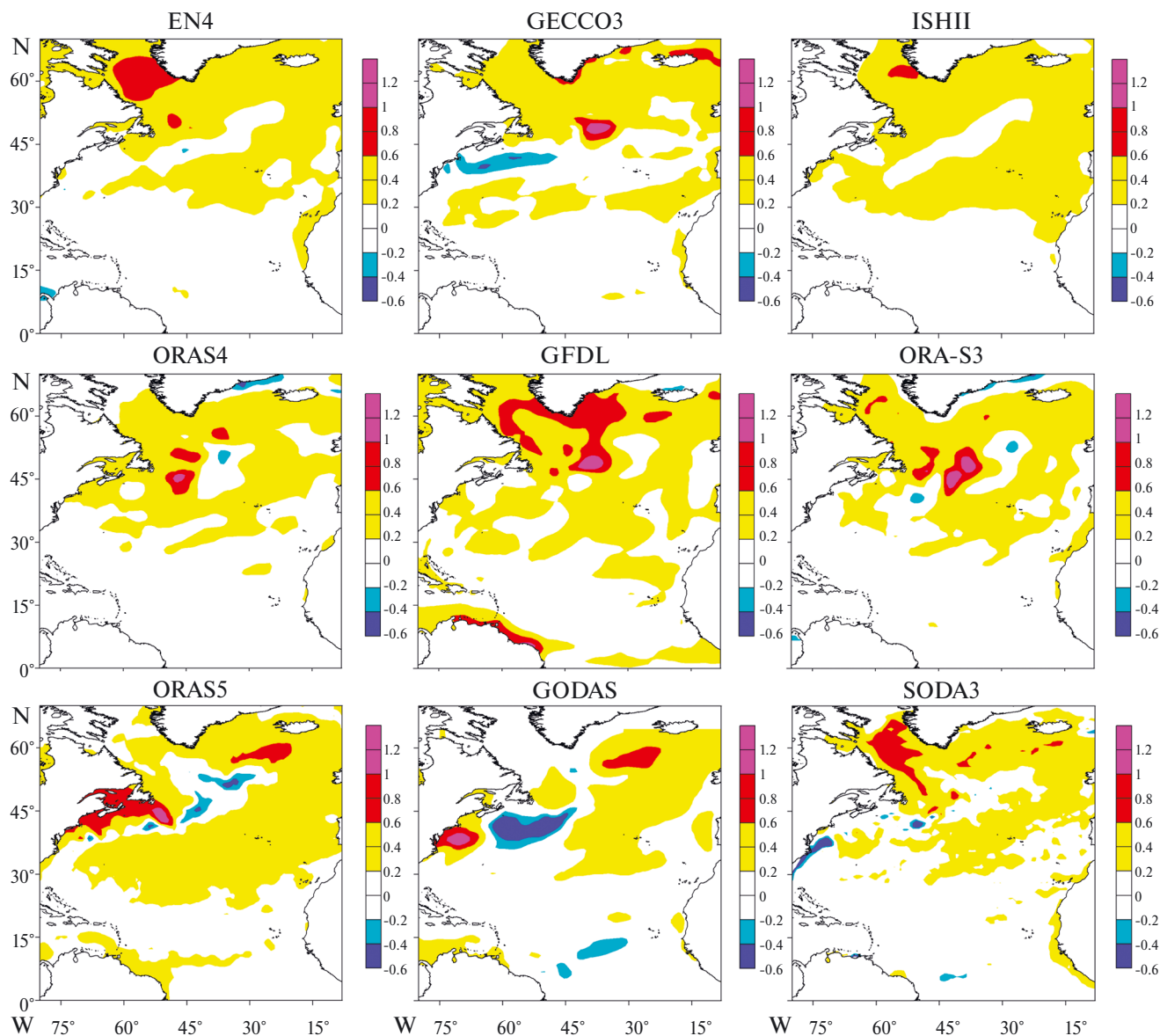


Рис. 2. Коэффициенты медианного тренда температуры вод в северной части Атлантического океана ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за период 1980–2011 гг., усредненные в слое 10–400 м.

разброс величин коэффициентов медианного тренда температуры океана по используемым данным. Так, по EN4 значимые коэффициенты медианного тренда в указанном регионе не обнаружены. Южнее 40° с.ш. значимые коэффициенты медианного тренда не обнаружены по GECCO3, ISHII, ORAS4, GFDL, ORA-S3 и ORAS5. Однако в этих широтах по GODAS отмечается область с высокими положительными коэффициентами медианного тренда (более $1^{\circ}\text{C}/10$ лет), а по SODA3 — область с высокими отрицательными коэффициентами медианного тренда (менее $-0.4^{\circ}\text{C}/10$ лет). Севернее 40° с.ш. коэффициенты медианного тренда

температуры океана отрицательны с величинами менее $-0.4^{\circ}\text{C}/10$ лет по GECCO3, но коэффициенты медианного тренда температуры океана малы и положительны по ISHII, ORAS4, GFDL и ORA-S3. В этом регионе по ORAS5 и SODA3 выделяются малые по площади чередующиеся области положительных и отрицательных коэффициентов медианного тренда температуры океана. Однако по GODAS севернее 40° с.ш. отмечается область с высокими отрицательными коэффициентами медианного тренда температуры океана (менее $-0.4^{\circ}\text{C}/10$ лет). Поэтому нельзя однозначно утверждать о характере трендов температуры океана

в системе Гольфстрим—Северо-Атлантическое течение в рассматриваемый период.

В Восточно—Гренландском течении долго-периодные тенденции изменения температуры океана в слое 10—400 м значимы и положительны по EN4, GECCO3, ISHII, GFDL, ORAS5 и SODA3. По GECCO3 и GFDL коэффициенты медианного тренда температуры океана имеют величины более $0.6^{\circ}\text{C}/10$ лет. Однако в этом течении по ORAS3 и ORAS4 отмечаются значимые отрицательные коэффициенты медианного тренда с величинами менее $-0.4^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Самые большие коэффициенты медианного тренда (более $1^{\circ}\text{C}/10$ лет) в период 1980—2011 гг. обнаружены по данным всех реанализов океана, за исключением SODA3. Однако области с такими величинами коэффициентов медианного тренда в разных массивах данных расположены в разных местах, что не позволяет выделить универсальную закономерность.

Таким образом, в период 1961—2011 гг. потепление северной части Атлантического океана, в основном, наблюдается в верхнем 400-метровом слое от экватора до 70° с.ш. За этот период рост медианы среднемесячной температуры океана в среднем по акватории и в окрестности Межпассатного противотечения, Гвианского течения и Канарского апвеллинга составил 0.5°C , а в системе Гольфстрим—Северо-Атлантическое течение — более 1°C . В используемых реанализах океана коэффициенты квантильного тренда температуры океана в среднем выше, чем в объективных анализах. В период 1980—2011 гг. интенсивное потепление северной части Атлантического океана, в основном, происходило в верхнем 400-метровом слое в высоких широтах (50° — 65° с.ш.). За этот период рост медианы среднемесячной температуры океана в субполярном круговороте составил 1°C . В системе Гольфстрим—Северо-Атлантическое течение отмечается большой разброс величин коэффициентов медианного тренда температуры океана. Поэтому нельзя однозначно утверждать о характере трендов температуры океана в этом регионе в указанный период. По данным всех реанализов океана, за исключением SODA3, выявлены области с самым большим потеплением, составляющим почти 3°C в период 1980—2011 гг. Однако такие области в разных массивах данных расположены в разных местах, что не позволяет установить общую закономерность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят анонимного рецензента за ценные замечания к первому варианту статьи и редакцию за оперативное и профессиональное рассмотрение статьи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 23-77-01054.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добролюбов С.А. Океан и изменения климата // Партнерство цивилизаций. 2020. № 1—2. С. 174—178.
2. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, P. 1—34.
3. Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., et al. World ocean heat content and thermosteric sea level change (0—2000 m), 1955—2010 // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. No. 10.
4. Багатинский В.А., Дианский Н.А. Вклады климатических изменений температуры и солёности в формирование трендов термохалинной циркуляции Северной Атлантики в 1951—2017 гг. // Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2022. № 3. С. 73—88.
5. Lyman J.M., Johnson G.C. Estimating global ocean heat content changes in the upper 1800 m since 1950 and the influence of climatology choice // Journal of Climate. 2014. V. 27. No. 5. P. 1945—1957.
6. Polyakov I.V., Alexeev V.A., Bhatt U.S., et al. North Atlantic warming: patterns of long-term trend and multidecadal variability // Climate Dynamics. 2010. V. 34. P. 439—457.
7. Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N., et al. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // Nature. 2013. V. 499. No. 7459. P. 464—467.
8. DelSole T., Tippett M.K., Shukla J. A significant component of unforced multidecadal variability in the recent acceleration of global warming // Journal of Climate. 2011. V. 24. No. 3. P. 909—926.
9. Good S.A., Martin M.J., Rayner N.A. EN4: quality-controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2013. V. 118. No. 12. P. 6704—6716.

10. *Ishii M., Kimoto M., Kachi M.* Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates // *Monthly Weather Review*. 2003. V. 131. No. 1. P. 51–73.
11. *Köhl A.* Evaluating the GECCO3 1948–2018 ocean synthesis – a configuration for initializing the MPI-ESM climate model // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. V. 146. No. 730. P. 2250–2273.
12. *Balmaseda M.A., Mogensen K., Weaver A.T.* Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4 // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2013. V. 139. No. 674. P. 1132–1161.
13. *Chang Y.-S., Zhang S., Rosati A., et al.* An assessment of oceanic variability for 1960–2010 from the GFDL ensemble coupled data assimilation // *Climate Dynamics*. 2013. V. 40. No. 3–4. P. 775–803.
14. *Balmaseda M.A., Vidard A., Anderson D.L.T.* The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3 // *Monthly Weather Review*. 2008. V. 136. No. 8. P. 3018–3034.
15. *Zuo H., Balmaseda M.A., Tietsche S., et al.* The ECMWF operational ensemble reanalysis–analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment // *Ocean science*. 2019. V. 15. No. 3. P. 779–808.
16. *Behringer D.W., Xue Y.* Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific Ocean // *Proc. Eighth Symp. on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Ocean, and Land Surface*. Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc. 2004. [Available online at <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/people/yxue/pub/13.pdf>]
17. *Carton J.A., Chepurin G.A., Chen L.* SODA3: a new ocean climate reanalysis // *Journal of Climate*. 2018. V. 31. No. 17. P. 6967–6983.
18. *Koenker R.* Quantile Regression. Econometric Society Monographs: Cambridge, 2005. 349 p.
19. *Тимофеев А.А., Стерин А.М.* Применение метода квантильной регрессии для анализа изменений характеристик климата // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 5. С. 27–41.
20. *Куктев Д.Б., Крыжов В.Н.* О сравнении различных методов оценки статистической значимости линейных трендов // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 11. С. 27–38.

LONG–PERIOD TRENDS IN WATER TEMPERATURE CHANGES IN THE NORTHERN PART OF THE ATLANTIC OCEAN FROM OCEAN REANALYSIS DATA

P. A. Sukhonos^{1,†}, V. V. Ivanov², N. A. Diansky^{2,3,4}

Presented by Academician of the RAS S.A. Dobrolyubov November 20, 2023

Received November 20, 2023

After revision December 05, 2023

Accepted December 14, 2023

¹*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russian Federation*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

³*Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Moscow, Russian Federation*

⁴*Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russian Federation*

[†]*E-mail: pasukhonis@mail.ru*

The results of assessing long–period changes in water temperature in the North Atlantic Ocean (0°–70° N, 8°–80° W) based on data from ocean reanalyses and objective analyses for the periods 1961–2011 and 1980–2011 are presented. The obtained estimates are based on the application of a nonparametric method of regression analysis (quantile regression) to the monthly ocean temperature for a quantile value of 0.5. During the period 1961–2011 warming was mainly observed in the upper 400 m layer in the region from the equator to 70° N. Over this 51-year period, the increase in the median monthly ocean temperature averaged over the analyzed water area ~0.5°C, and in the Gulf Stream–North Atlantic Current system ~1°C. During the period 1980–2011 warming in the North Atlantic Ocean mainly occurred in the upper 1 km layer at high latitudes (50°–65° N). Over this 32-year period, the increase in the median monthly ocean temperature in the subpolar gyre in the upper 400 m layer was ~1°C.

Keywords: temperature, ocean reanalysis, quantile regression, North Atlantic Ocean