

УДК 551.46(261)

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ СОЛЕННОСТИ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ ОКЕАНСКИХ РЕАНАЛИЗОВ В 1980–2011 гг.

© 2025 г. П. А. Сухонос^{a,*}, Н. А. Дианский^{b,c,d}

^aИнститут природно-технических систем, ул. Ленина, 28, Севастополь, 299011 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

^cИнститут вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН,
ул. Губкина, 8, Москва, 119333 Россия

^dГосударственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова,
Кропоткинский пер., 6, стр. 1, Москва, 119034 Россия

*e-mail: pasukhonis@mail.ru

Поступила в редакцию 25.04.2024 г.

После доработки 17.09.2024 г.

Принята к публикации 15.11.2024 г.

Долгопериодные тенденции изменения солёности вод Северной Атлантики (0°–70° с.ш. 8°–80° з.д.) оцениваются по данным нескольких океанских реанализов и объективных анализов в период 1980–2011 гг. Полученные оценки основаны на применении непараметрического метода регрессионного анализа (квантильной регрессии) к среднемесячной солёности океана для значения квантиля 0.5. В рассматриваемый период в полосе широт 0°–15° с.ш. в слое 10–50 м солёность уменьшилась на 0.17 ± 0.10 ЕПС. В полосе широт 20°–35° с.ш. увеличение солёности в слое 10–400 м составляет 0.08 ± 0.03 ЕПС. В восточной части Субтропической Атлантики (30°–40° с.ш. 25°–45° з.д.) значимое осолонение верхнего 400 м слоя происходит во все месяцы. Это означает расширение в северо-западном направлении области высокой солёности в субтропиках. В западной части субполярного круговорота солёность в верхних 400 м за этот 32-летний период увеличилась на 0.20 ± 0.05 ЕПС.

Ключевые слова: солёность, реанализ океана, квантильная регрессия, Северная Атлантика

DOI: 10.31857/S0002351525020038, **EDN:** GKNIOI

1. ВВЕДЕНИЕ

Долгопериодные изменения солёности океана, как одного из фундаментальных свойств океанской воды, имеют значимые последствия для глобальной климатической системы. Благодаря своему влиянию на процессы в пограничном слое солёность модулирует взаимодействия между приводным слоем атмосферы и верхним слоем океана, включая обмен потоками тепла и CO₂. Солёность является важным параметром океана, который, влияя на плотность, регулирует интенсивность ряда процессов, таких как термохалинная циркуляция [Huang et al., 1992; Rahmstorf, 1995] и процессы субдукции [Fedorov, 2004]. Бо-

лее теплые водные массы погружаются на большие глубины океана за счёт более высокой солёности, что приводит к большему поглощению тепла океаном [Mauritzen et al., 2012]. Изменение солёности на поверхности океана также влияет на стратификацию верхнего слоя океана [Yamaguchi and Suga, 2019; Li et al., 2020]. Перестройка стратификации водного столба, вызванная изменениями солёности, может изменять функционирование экосистем [Greene et al., 2012; Li et al., 2015]. Таким образом, изменения солёности оказывают воздействие на широкий спектр процессов в океане. Несмотря на это, исторически за солёностью накоплено меньше наблюдений, чем за температурой. Поэтому важно исследовать

разномасштабную, особенно долгопериодную, изменчивость солёности, чтобы уточнить её роль в современном изменении климата.

Средняя климатическая величина и изменчивость солёности океана изменились в последние десятилетия под влиянием глобального потепления: районы с высокой солёностью на поверхности океана стали более солёными, а районы с низкой солёностью на поверхности океана — более пресными [Boyer et al., 2005; Durack et al., 2012; Durack, 2015; Sathyanarayanan et al., 2021]. Это приводит к увеличению глобального среднего контраста между регионами с высокой и низкой солёностью [Rhein et al., 2013]. Этот контраст, оцененный для акватории океана к югу от 70° с.ш., увеличился на 0.13 ЕПС (с 0.08 ЕПС по 0.17 ЕПС) с 1950 по 2008 год согласно данным из [Durack and Wijffels, 2010]. Следовательно, необходимо проанализировать изменение солёности в условиях меняющегося климата, сосредоточив внимание на изменении вертикальной структуры солёности и различиях между доступными данными из разных источников.

Амплитуда долгопериодных тенденций изменения солёности океана согласуется со стандартным отклонением десятилетней изменчивости, что позволило предположить, что по-прежнему трудно получить статистически значимые оценки долгопериодных тенденций на основе существующей краткой базы данных по Мировому океану [Stammer et al., 2021]. Авторы этой работы обнаружили, что во многих регионах тенденции изменения солёности в верхнем слое океана, оцененные для периода 1960–2010 гг. по данным реанализов GECCO3, SODA v2.2.4, ORAS4 и GFDL, противоположны тенденциям, рассчитанным в период 2004–2017 гг. по данным наблюдений. Это указывает на высокую амплитуду десятилетней изменчивости и, таким образом, зависимость любого анализа долгопериодных тенденций от рассматриваемого периода. Долгопериодные тенденции изменения солёности в период 1950–2008 гг., полученные на основе обработки свыше 1.6 миллиона профилей из исторических архивов и международной программы Арго, подробно проанализированы в [Durack and Wijffels, 2010]. Показано, что изменения солёности поверхности океана (СПО) за этот период статистически значимы на уровне доверия 99% на 43.8% площади Мирового океана. В субтропических круговоротах, для которых харак-

терно преобладание испарения над осадками, во всех океанах происходит междесятилетнее увеличение солёности. В Субтропической Атлантике (40° с.ш. 48° з.д.) эти значения превышают 0.45 ± 0.12 ЕПС/50 лет. В регионах, где осадки преобладают над испарением, происходит сильное опреснение. В Атлантике область под внутритропической зоной конвергенции опресняется, но с севера и юга она окаймлена областями очень сильно возрастающей солёности. Глобальное изменение СПО невелико (0.0024 ± 0.051 ЕПС/50 лет), тогда как среднее по бассейну Атлантического океана изменение СПО составляет 0.078 ± 0.095 ЕПС/50 лет. Оценки, полученные по новому глобальному массиву данных по солёности IAP–05, построенному на регулярной сетке с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, начиная с 1960 года, показали, что в Атлантическом океане наблюдается резкое увеличение солёности в слое 0–2000 м равное 0.024 ± 0.013 ЕПС в пересчёте на столетие [Li et al., 2023]. Долгопериодные тенденции изменения солёности, полученные в работе [Дианский и Багатинский, 2019] для периода 1948–2017 гг., показали, что в верхнем ~ 1 км слое Северной Атлантики происходит осолонение. В глубинных слоях, наоборот, обнаружено опреснение. Изменение солёности глубинных вод обусловлено участием в процессе вертикального конвективного перемешивания пресных поверхностных вод, сформировавшихся из-за таяния льдов Гренландии, и опресненных вод, вынесенных из Северного Ледовитого океана [Дианский и Багатинский, 2019]. Реконструированная солёность, усредненная в верхнем 2000 м слое, сильно возросла в Атлантическом океане (35° ю.ш. — 75° с.ш.) с 1990-х гг. [Cheng et al., 2020]. Важной особенностью является тенденция опреснения в Субполярной Атлантике, которая противоположна положительным тенденциям в других регионах Атлантического океана. Отрицательный тренд СПО на большей части Субполярной Атлантики также обнаруживается за последние 120 лет [Reverdin et al., 2019].

Описание разномасштабной изменчивости солёности во многом определяется существующими (доступными) массивами океанических данных. Численные модели океана и методы усвоения данных постоянно развиваются и становятся все более востребованными для восстановления истории эволюции океана. Однако

продукты реанализа, полученные на основе разных моделей, различаются методами, разрешением и стратегиями исправления ошибок, что может привести к существенному расхождению в качестве данных. В регионах с интенсивными океаническими фронтами данные о солёности океана, полученные из массивов реанализов океана, имеют низкую достоверность [Shi et al., 2017]. Большинство реанализов указывают на положительную тенденцию изменения глобальной солёности в верхнем слое океана (от 0 до 300 м) и отрицательную тенденцию в подповерхностном слое (до 1500 м) [Shi et al., 2017]. Эти результаты подтверждены в [Stammer et al., 2021], где также показано, что средний тренд солёности в верхнем 300 м слое является положительным, тогда как средний тренд солёности, усреднённый в верхнем 700 м слое, является отрицательным.

Опубликованные оценки долгопериодных тенденций изменения солёности Северной Атлантики, полученные по разным массивам данных различной длительности, противоречивы, что усложняет их интерпретацию. Это приводит к неоднозначности в структуре и величине долгопериодного изменения солёности океана. Цель данной работы — обнаружить и количественно оценить тенденции изменения солёности вод Северной Атлантики на основе нескольких массивов данных в период 1980–2011 гг. Изучение долгопериодных тенденций в данном исследовании проводится с помощью квантильной регрессии для значения квантиля 0.5. Такой подход представляется корректным при анализе временных рядов с нестационарной статистической структурой, обусловленной ростом количества наблюдений и изменениями глобального гидрологического цикла во второй четверти XX века. Кроме этого, в отличие от предыдущих исследований наше внимание будет сосредоточено на анализе изменений солёности от поверхности до дна.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Использованы среднемесячные данные о солёности океана из массивов объективного анализа океана EN.4.2.2 (1945–2020 гг.) [Good et al., 2013], IAP (1948–2018 гг.) [Cheng et al., 2016] и ISHII (1945–2012 гг.) [Ishii et al., 2003] и массивов реанализа океана, включая: ESTOC (1957–2016 гг.) [Osafune et al., 2015], GECCO3 версия 3S6m (1948–2018 гг.) [Köhl, 2020], GFDL (1961–2015 гг.) [Chang et al., 2013], GODAS

(1980–2021 гг.) [Behringer and Xue, 2004], ORA-S3 (1959–2011 гг.) [Balmaseda et al., 2008], ORAS4 (1958–2014 гг.) [Balmaseda et al., 2013], ORAS5 (1979–2018 гг.) [Zuo et al., 2019], SODA версия 3.12.2 (1980–2017 гг.) [Carton et al., 2018]. Исследуемый регион ограничен координатами 0° – 70° с.ш. 8° – 80° з.д.

В качестве количественного показателя долгопериодного изменения солёности 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 [Koenker, 2005; Тимофеев и Стерин, 2010]. 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:

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

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 $\beta(1/2) = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i'\beta|$, то есть минимизируется сумма абсолютных отклонений, что соответствует регрессии на основе медианы абсолютных отклонений.

Определение стандартных ошибок коэффициентов квантильной регрессии выполнено методом бутстреп [Koenker, 2005], с помощью которого возможно получение наиболее объективных оценок достоверности линейных тенденций [Киктев и Крыжов, 2004]. 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 ($\sim 30\%$ 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 95%. Представлены только статистически значимые результаты.

Расчёты проводились для каждого массива данных в каждом узле сетки на всех горизонтах от поверхности до дна за общий для используемых массивов данных временной интервал 1980–2011 гг. Затем коэффициенты линейных трендов солёности океана усреднялись зонально и в слое 10–400 м. Нижняя граница указанного слоя выбрана по результатам анализа среднезональных трендов. Отметим, что сезонные изменения солёности на большей части Мирового океана обнаруживаются в верхнем слое океана до глубины 350 м [Liu et al., 2022].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Среднезональные тренды солёности вод Северной Атлантики в период 1980–2011 гг. показаны на рис. 1. Наибольшие величины коэффициентов квантильного тренда сосредоточены в верхнем 1000 м слое. Ниже 1000 м долгопериодные тенденции изменения солёности почти не выражены. Исключение составляет отрицательный квантильный тренд солёности на глубине 1000 м в полосе широт 0° – 15° с.ш. по данным GODAS с величинами менее -0.04 ЕПС/10 лет и в полосе широт 30° – 40° с.ш. по данным GECCO3 и ORAS4 с величинами около -0.03 ЕПС/10 лет. В полосе широт 0° – 15° с.ш. в слое 10–50 м отмечаются преимущественно отрицательные коэффициенты квантильного тренда солёности со значениями от -0.14 до -0.04 ЕПС/10 лет почти по всем используемым данным, за исключением ESTOC, GECCO3 и GODAS. В полосе широт 20° – 40° с.ш. в 10–400 м слое положительные коэффициенты квантильного тренда солёности

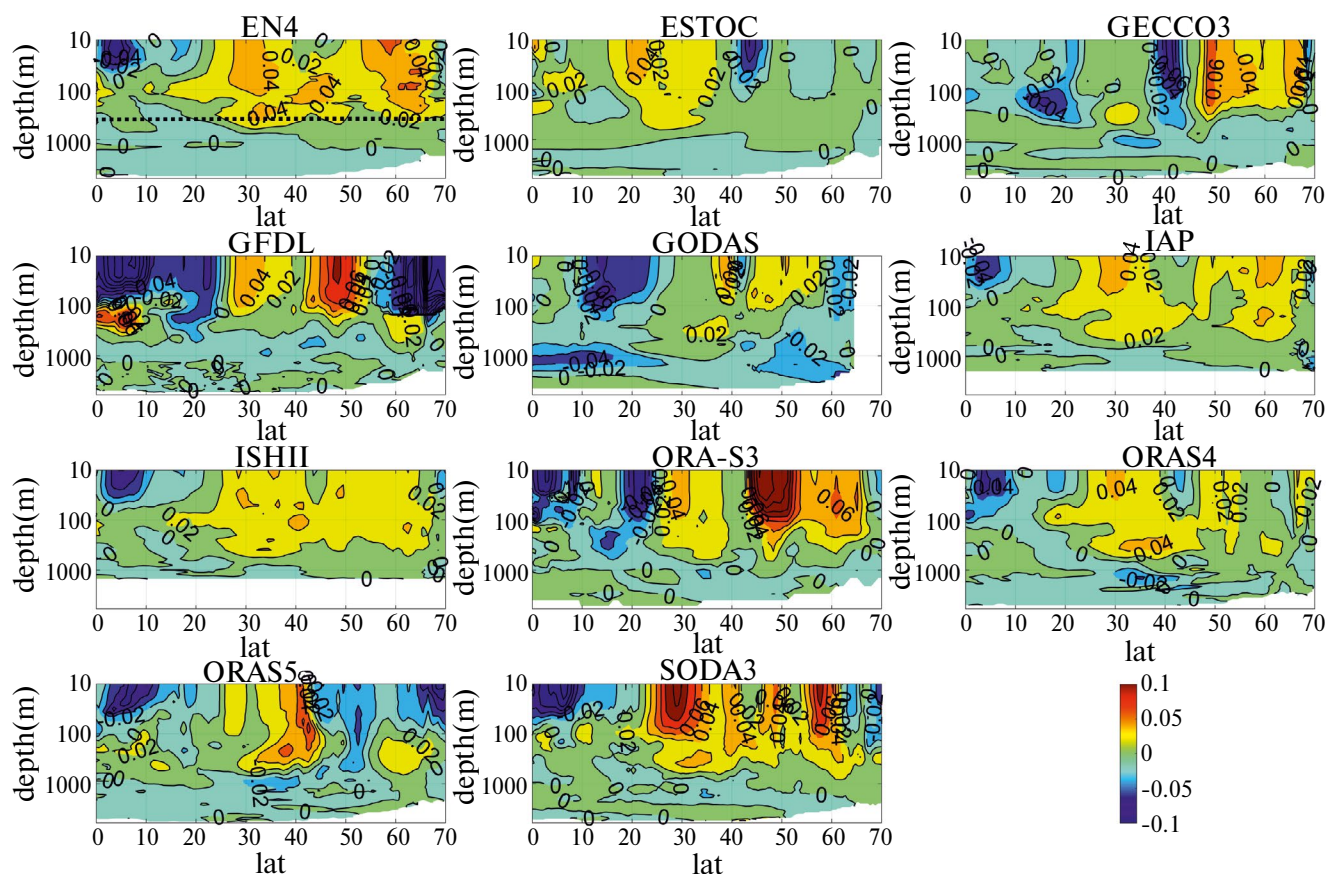


Рис. 1. Зонально осредненные коэффициенты медианного тренда солёности вод Северной Атлантики за период 1980–2011 гг. Вертикальная ось представлена в логарифмическом масштабе. Изолинии проведены через 0.02 ЕПС/10 лет. Чёрная пунктирная линия на верхнем правом рисунке показывает горизонт 400 м

получены почти по всем используемым данным, за исключением GECCO3 и GODAS. Положительные коэффициенты квантильного тренда солёности по данным ORA-S3 отмечаются в полосе широт 25° – 40° с.ш. Наибольшие величины коэффициентов квантильного тренда солёности в полосе широт 25° – 35° с.ш. выявлены по данным SODA3 и составляют более 0.05 ЕПС/10 лет (около 0.1 ЕПС/10 лет) в 10–100 м слое (в 10–50 м слое). В высоких широтах по данным некоторых реанализов океана отмечаются большие величины коэффициентов среднезональных трендов. В 10–400 м слое в полосе широт 40° – 45° с.ш. (45° – 55° с.ш.) по данным GECCO3 обнаружены высокие отрицательные (положительные) коэффициенты квантильного тренда солёности с величинами около -0.1 ЕПС/10 лет (0.1 ЕПС/10 лет). В полосе широт 42° – 52° с.ш. (42° – 54° с.ш.) в 10–150 м (10–165 м) слое по данным GFDL (ORA-S3) получены высокие положительные коэффициенты квантильного тренда солёности с величинами более 0.05 ЕПС/10 лет. В полосе

широт 60° – 70° с.ш. в 10–150 м (10–50 м) слое по данным GFDL (ORAS5) получены высокие отрицательные коэффициенты квантильного тренда солёности с величинами около -0.1 ЕПС/10 лет.

Перед тем, как перейти к анализу долгопериодных тенденций изменения солёности в слое 10–400 м, рассмотрим величины солёности вод Северной Атлантики, усредненные в этом слое в рассматриваемый период (рис. 2). Выделяются субтропический максимум солёности, снижение солёности в тропических и субполярных широтах и высокие горизонтальные градиенты солёности в динамической системе Гольфстрим–Североатлантическое течение. Однако между рассматриваемыми массивами данных есть некоторые различия. Область с солёностью менее 35.5 ЕПС в Тропической Атлантике согласно большинству массивов данных расположена восточнее 30° з.д. По данным ESTOC и IAP область с указанной солёностью почти отсутствует или мала, а по данным GECCO3 и GODAS площадь этой

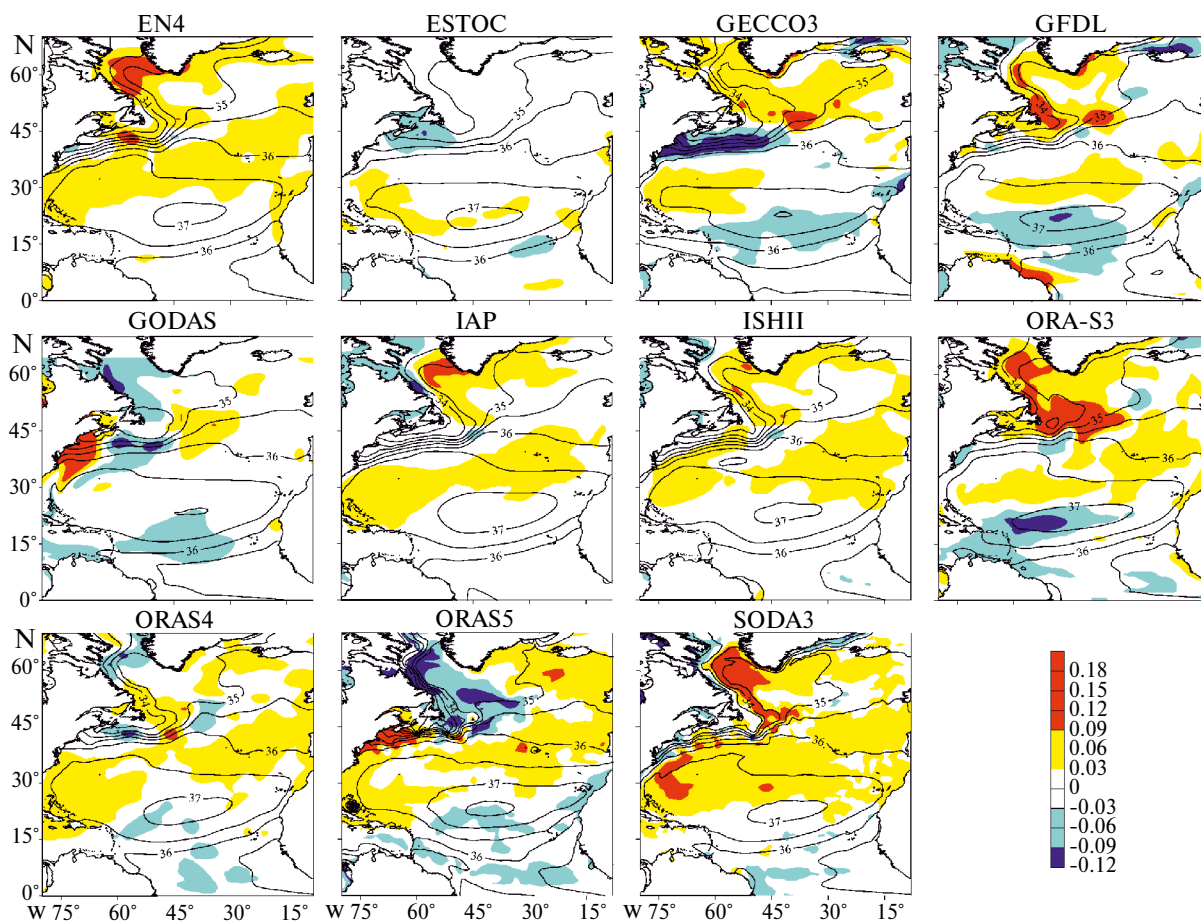


Рис. 2. Коэффициенты медианного тренда солёности вод Северной Атлантики (ЕПС/10 лет) за период 1980–2011 гг., усредненные в слое 10–400 м. Изолиниями показаны средние в слое 10–400 м величины солёности

области в полосе широт 0° – 15° с.ш. максимальна. Площадь области высокой солёности (более 37 ЕПС) в субтропических широтах минимальна по данным GECCO3 и GODAS и максимальна по данным ORAS5. Кроме этого, только по данным ORAS5 в центральной части субтропического круговорота обнаружена область со средней в слое 10–400 м солёностью более 37.5 ЕПС. Таким образом, пространственная структура солёности верхнего слоя Северной Атлантики, полученная по используемым данным, в целом согласуется между собой и соответствует её климатическому распределению. Это даёт основания для адекватной оценки линейных трендов солёности.

Анализ долгопериодных тенденций изменения солёности в слое 10–400 м в период 1980–2011 гг. в Северной Атлантике показал следующее (рис. 2). В Гвианском течении отмечаются положительные коэффициенты квантильного тренда солёности по данным GFDL (с величинами более 0.09 ЕПС/10 лет) и отрицательные коэффициенты квантильного тренда солёности по данным ORA-S3 (с величинами менее -0.03 ЕПС/10 лет). По остальным используемым массивам данных значимых коэффициентов квантильного тренда солёности в рассматриваемом течении не обнаружено.

В Тропической Атлантике в рассматриваемый период выраженные долгопериодные тенденции изменения солёности по данным объективных анализов океана EN4, IAP и ISHII отсутствуют. Однако по данным реанализов океана ESTOC, ORAS4, ORAS5 и SODA3 обнаружены малые по площади области с отрицательными коэффициентами квантильного тренда (с величинами менее -0.03 ЕПС/10 лет). По данным ORA-S3 отрицательные тенденции изменения солёности с величинами менее -0.09 ЕПС/10 лет обнаружены в западной части области высокой солёности в субтропических широтах. По данным GECCO3, GFDL и GODAS в полосе широт 10° – 20° с.ш. обнаружены обширные области с отрицательными коэффициентами квантильного тренда солёности верхнего слоя океана.

В Канарском апвеллинге получены положительные коэффициенты квантильного тренда солёности по данным EN4 и ORA-S3, околонулевые коэффициенты квантильного тренда солёности по данным IAP и отрицательные коэффициенты квантильного тренда солёности по данным ORAS5. Вдоль северо-западной оконечности Африканского континента положительные коэффи-

циенты квантильного тренда солёности обнаружены к северу от 25° с.ш. по данным ISHII, ORAS4 и SODA3 и к югу от 25° с.ш. по данным ESTOC и GODAS. Однако по данным GECCO3 и GFDL к северу от 25° с.ш. обнаружены отрицательные коэффициенты квантильного тренда солёности, а к югу от 25° с.ш. — положительные.

В полосе широт 20° – 35° с.ш. отмечаются преимущественно положительные коэффициенты квантильного тренда солёности (с величинами более 0.03 ЕПС/10 лет) почти по всем используемым данным. По данным GECCO3 и ESTOC положительные коэффициенты квантильного тренда солёности отмечаются в западной части субтропического круговорота. По данным GODAS высоких по абсолютной величине коэффициентов квантильного тренда солёности в указанной полосе широт, за исключением окрестности Гольфстрима, не обнаружено. В целом, такое пространственное распределение коэффициентов квантильного тренда означает расширение в северо-западном направлении области высокой солёности в субтропических широтах в рассматриваемый период.

В динамической системе Гольфстрим-Североатлантическое течение обнаружены чередующиеся области малой площади с разными по знаку коэффициентами квантильного тренда солёности по данным EN4, ESTOC, IAP, ISHII, ORAS4 и SODA3. Севернее 45° с.ш. по данным GECCO3, GFDL, GODAS, ORA-S3 (ORAS5) отмечаются положительные (отрицательные) коэффициенты квантильного тренда солёности с величинами по абсолютной величине превышающими 0.09 ЕПС/10 лет. Южнее 45° с.ш. по данным GODAS и ORAS5 (GECCO3) отмечаются положительные (отрицательные) коэффициенты квантильного тренда солёности верхнего слоя океана.

В субполярном круговороте по данным ESTOC значимые долгопериодные тенденции изменения солёности не обнаружены. При этом по данным GECCO3 большая часть субполярного круговорота характеризуется положительными коэффициентами квантильного тренда солёности (со значениями более 0.03 ЕПС/10 лет). В западной части субполярного круговорота получены коэффициенты квантильного тренда солёности положительные по данным EN4, GFDL, IAP, ISHII, ORA-S3 и SODA3 (со значениями от 0.04 до 0.10 ЕПС/10 лет) и отрицательные по данным GODAS (-0.03 ЕПС/10 лет) и ORAS5 (-0.07 ЕПС/10 лет). В восточной части субполярного

круговорота обнаружены небольшие по площади области с положительными коэффициентами квантильного тренда солености по данным GODAS и ORAS5 и отрицательными коэффициентами квантильного тренда солености по данным GFDL, ORA-S3 и SODA3.

Из анализа рис. 1 и 2, полученных по среднемесячным данным, следует, что в период 1980–2011 гг. в восточной части Субтропической Атлантики (30° – 40° с.ш. 25° – 45° з.д.) расположена область значимого осолонения верхнего слоя океана. На рис. 3 показаны коэффициенты медианного тренда солености по месяцам в этой области в слое 0–1000 м. Их величины, превышающие 0.03 ЕПС/10 лет, значимы на уровне доверия 95%. По данным EN4 осолонение охватывает верхние 400 м, достигая 500 м в летний сезон. Коэффициенты медианного тренда в приповерхностном слое с мая по октябрь имеют величины более 0.05 ЕПС/10 лет. По данным ESTOC и GECCO3 значимое осолонение в рассматриваемой области отсутствует. По данным GFDL осолонение отмечается в верхних 150 м с максимумом в приповерхностном слое с июня по август (0.06 ЕПС/10 лет). По данным GODAS

осолонение происходит в слое 200–400 м во все месяцы с максимумом на 300 м с января по март (более 0.04 ЕПС/10 лет). Согласно данным IAP и ISHII осолонение регистрируется в верхних 400 м во все месяцы. По данным ISHII коэффициенты медианного тренда в этом слое с апреля по июнь превышают 0.04 ЕПС/10 лет. По данным ORA-S3 осолонение наблюдается в верхних 450 м во все месяцы кроме периода с ноября по март в верхних 50 м. Наибольшие коэффициенты медианного тренда по этим данным (более 0.05 ЕПС/10 лет) получены на 50 м с июля по сентябрь. По данным ORAS4 осолонение отмечается в верхних 450 м кроме периода с августа по февраль в верхних 50 м. По этим данным коэффициенты медианного тренда в слое 200–400 м с января по сентябрь превышают 0.05 ЕПС/10 лет. По данным ORAS5 осолонение охватывает верхние 500 м во все месяцы. По этим данным в слое 200–300 м обнаружены максимальные коэффициенты медианного тренда с величинами более 0.07 ЕПС/10 лет. По данным SODA3 осолонение охватывает верхние 400 м, достигая 500 м в летний сезон. По этим данным на поверхности получены коэффици-

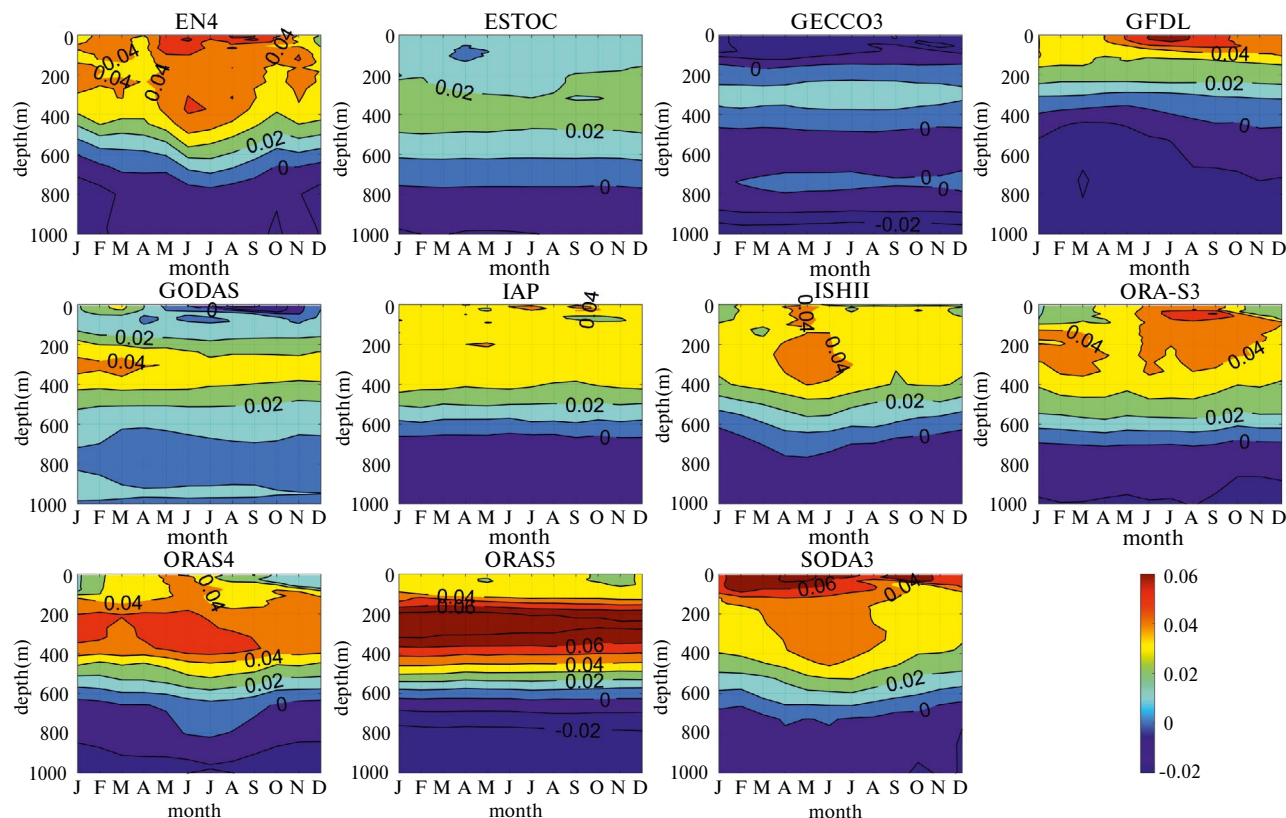


Рис. 3. Коэффициенты медианного тренда солености по месяцам в восточной части Субтропической Атлантики (30° – 40° с.ш. 25° – 45° з.д. 0–1000 м) в период 1980–2011 гг. Изолинии проведены через 0.01 ЕПС/10 лет

енты медианного тренда с величинами более 0.07 ЕПС/10 лет в апреле–мае.

Во многих исследованиях для количественной оценки и отображения согласия выявленных изменений используются простые критерии, например, соотношение между разбросом по моделям (измеренным как одно или два стандартных отклонения) по сравнению со средним значением по ансамблю моделей (см., например, [Deser et al., 2012]). Нами адаптирован альтернативный метод из [Tebaldi et al., 2011]. Концептуальная идея метода заключается в следующем. Если данные из нескольких источников, основанных на разных, но правдоподобных предположениях, упрощениях и параметризациях, приводят к общему результату, то в нём имеется более высокая уверенность, чем, если бы результат был получен из одного источника данных или данные из разных источников указывали на противоположные результаты. Такой способ отображения изменений и согласия между массивами данных позволяет чётко отделить отсутствие сигнала (в нашем случае это отсутствие значимой долгопериодной тенденции) от недостатка информации из-за несогласия массивов данных (т.е. наличия значимых, но разнонаправленных тенденций).

На рис. 4 приведены графики, показывающие области, в которых значимые долгопери-

одные тенденции изменения солёности вод Северной Атлантики достоверно регистрируются или отсутствуют, и области, для которых нельзя однозначно определить тенденцию изменения солёности по используемым массивам данных. Долгопериодная тенденция изменения солёности в период 1980–2011 гг. достоверно регистрируется / не определена / отсутствует если из 11 используемых массивов данных 6 и больше / 4 или 5 / 3 и меньше указывают на наличие значимой на 95% уровне доверия тенденции.

Для зонально осредненных коэффициентов медианного тренда долгопериодное уменьшение солёности в рассматриваемый период достоверно регистрируется в верхнем 50 м слое в полосе широт 2° – 8° с.ш. Эта область опреснения не проявляется при осреднении коэффициентов медианного тренда в слое 10–400 м. Долгопериодное увеличение солёности достоверно обнаруживается в полосе широт 27° – 35° с.ш. в слое 0–100 м, 30° – 40° с.ш. в слое 100–380 м, 45° – 50° с.ш. в слое 0–200 м и 58° – 63° с.ш. в слое 100–200 м. Что касается коэффициентов медианного тренда, осредненных в слое 10–400 м, то большинство используемых массивов данных указывает на осолонение в области Саргассова моря, восточной части Субтропической Атлантики и западной и северной частей субполярного круговорота.

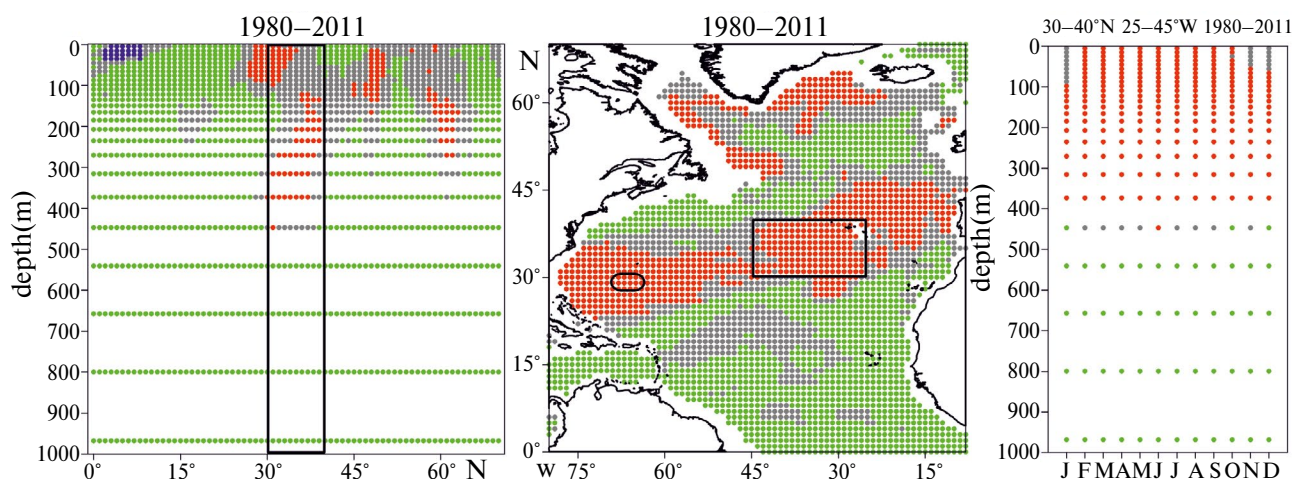


Рис. 4. Области Северной Атлантики, в которых в период 1980–2011 гг. отмечается согласованное по используемым массивам данных значимое опреснение (синий), в которых значимые тенденции изменения солёности не определены (серый), в которых значимые тенденции изменения солёности отсутствуют (зеленый) и в которых отмечается согласованное значимое осолонение (красный) для зонально осредненных коэффициентов медианного тренда (слева), средних коэффициентов медианного тренда в слое 10–400 м (по центру) и коэффициентов медианного тренда по месяцам в области с координатами 30° – 40° с.ш. 25° – 45° з.д. (справа), выделенной черными прямоугольниками. Скругленный прямоугольник на рисунке по центру охватывает узлы сетки, в которых 10 из 11 используемых массивов данных показывают согласованные значимые тенденции

На остальной части Северной Атлантики, согласно большинству массивов данных, долгопериодное изменение солёности в верхнем 400 м слое в рассматриваемый период отсутствует. Долгопериодное увеличение солёности в восточной части Субтропической Атлантики (30° – 40° с.ш. 25° – 45° з.д.) выражено во все месяцы. Осолонение достоверно регистрируется в верхних 400 м, достигая 450 м в июне, кроме периода с ноября по январь в верхних 50 м.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рассматриваемый период по используемым данным достоверно обнаружено значимое опреснение в пределах верхнего перемешанного слоя области низкой солёности под внутритропической зоной конвергенции и значимое осолонение в пределах верхних 400 м в средних и высоких широтах. Выявленное обострение пространственных контрастов СПО между регионами с низкой и высокой солёностью полностью согласуется с интенсификацией глобального гидрологического цикла в условиях крупномасштабного потепления и увлажнения атмосферы (см., например, [Durack et al., 2012; Durack, 2015] и др.). Это может означать, что большинство используемых массивов данных в целом адекватно воспроизводят долгопериодную эволюцию солёности верхнего слоя Северной Атлантики.

Согласно полученным результатам, область высокой солёности в субтропических широтах расширяется в северо-западном направлении в верхних 400 м. Это может свидетельствовать о проникновении высокосолёных субтропических вод в северные широты, т.е. о меридиональном смещении (расширении) субтропического круговорота, особенно в его северо-восточной части. Анализ данных наблюдений из разных источников показал наличие положительного линейного тренда СПО в Атлантическом океане (30° ю.ш. – 50° с.ш.) в период 1977–2002 гг., особенно выраженного между 20° и 45° с.ш. [Reverdin et al., 2007]. По оценкам этих авторов, в некоторых областях внутри указанной полосы широт дисперсия линейного тренда СПО может достигать 16% от общей дисперсии среднегодовых временных рядов. Кроме этого, анализ баланса солёности в период 1950–2010 гг., выполненный по данным реанализа SODA версия 2.2.4, также подтверждает увеличение солёности верхнего перемешанного слоя в субтропических максимумах солё-

ности во всех океанских бассейнах [Melzer and Subrahmanyam, 2017]. В качестве основной причины выявленных изменений солёности авторы этой работы указывают увеличение испарения с поверхности океана.

Также наши результаты показывают, что в рассматриваемый период в западной и северной части субполярного круговорота происходило увеличение солёности. В работах [Polyakov et al., 2013; Rabe et al., 2014] отмечается, что осолонение в Субполярной Атлантике совпало с накоплением пресной воды в Северном Ледовитом океане в период с середины 1990-х по конец 2000-х. Анализ данных наблюдений указывает на положительную тенденцию изменения солёности в верхних 500 м в море Лабрадор в период с 1980 по 2011 год (см. рис. 4 из [Holliday et al., 2020]), что также согласуется с полученными нами результатами. Согласно [Holliday et al., 2020], в 2012–2016 гг. в Субполярной Атлантике произошло резкое опреснение, обусловленное крупномасштабными изменениями циркуляции океана, которые были вызваны атмосферным воздействием.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе нескольких массивов данных реанализов и объективных анализов океана оценены долгопериодные тенденции изменения солёности Северной Атлантики (0° – 70° с.ш. 8° – 80° з.д.) с помощью метода квантильной регрессии для значения квантиля 0.5 в период 1980–2011 гг. Использование большого количества массивов данных позволяет получить не зависящие от конкретного массива данных результаты и тем самым повысить достоверность полученных оценок.

Согласно анализу среднезональных трендов, в полосе широт 0° – 15° с.ш. в 10–50 м слое обнаружены преимущественно отрицательные тенденции изменения солёности. В рассматриваемый период согласно почти всем используемым данным, за исключением ESTOC, GECCO3 и GODAS, солёность уменьшилась на 0.17 ± 0.10 ЕПС. В полосе широт 20° – 40° с.ш. в 10–400 м слое получены положительные коэффициенты квантильного тренда солёности почти по всем используемым данным, за исключением GECCO3 и GODAS.

В Гвианском течении значимые тенденции изменения солёности не обнаружены почти по всем используемым данным, за исключением GFDL (значимое осолонение) и ORA-S3 (зна-

чимое опреснение). В целом в Тропической Атлантике по данным объективных анализов океана выраженные тенденции изменения солёности отсутствуют, а по данным реанализов океана отмечается незначимое опреснение.

В полосе широт 20° – 35° с.ш. осолонение в слое 10–400 м за 32-летний период составляет 0.08 ± 0.03 ЕПС и отмечается почти по всем используемым данным, за исключением GODAS. В восточной части Субтропической Атлантики (30° – 40° с.ш. 25° – 45° з.д.) по используемым данным, за исключением ESTOC и GECCO3, значимое осолонение верхнего 400 м слоя происходит во все месяцы. Солёность здесь за рассматриваемый период возросла в среднем почти на 0.1 ЕПС. Это означает расширение в северо-западном направлении области высокой солёности в субтропиках.

Значимые тенденции изменения солёности в субполярном круговороте по данным ESTOC (GECCO3) отсутствуют (положительны). В западной части субполярного круговорота за 32-летний период почти по всем используемым данным обнаружено осолонение равное 0.20 ± 0.05 ЕПС. Исключение составляют данные GODAS и ORAS5, согласно которым в этом регионе отмечается значимое опреснение.

Наряду с областями Северной Атлантики, в которых большинство источников данных согласованно показывают осолонение верхних 400 м, также надёжно выделены области, в которых значимые долгопериодные тенденции изменения солёности отсутствуют. Отметим также, невысокую согласованность долгопериодных тенденций изменения солёности в реанализах океана. Это следует из большой площади областей, для которых в разных реанализах получены значимые, но разнонаправленные тенденции.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую признательность анонимным рецензентам за полезные комментарии, позволившие улучшить качество рукописи. Авторы благодарны редакции за оперативное и профессиональное рассмотрение статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счёт средств Российского научного фонда, проект № 23-77-01054.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дианский Н.А., Багатинский В.А. Термохалинная структура вод Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультидекадной осцилляции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 157–170. <https://doi.org/10.31857/S0002-3515556157-170>
- Киктев Д.Б., Крыжов В.Н. О сравнении различных методов оценки статистической значимости линейных трендов // Метеорология и гидрология. 2004. № 11. С. 27–38.
- Тимофеев А.А., Стерин А.М. Применение метода квантильной регрессии для анализа изменений характеристик климата // Метеорология и гидрология. 2010. № 5. С. 27–41.
- Balmaseda M.A., Mogenssen K., Weaver A.T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4 // Quart. J. Royal. Meteorol. Soc. 2013. V. 139. № 674. P. 1132–1161. <https://doi.org/10.1002/qj.2063>
- Balmaseda M.A., Vidard A., Anderson D.L.T. The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3 // Mon. Wea. Rev. 2008. V. 136. № 8. P. 3018–3034. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2433.1>
- 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>]
- Boyer T.P., Levitus S., Antonov J.I. et al. Linear trends in salinity for the World Ocean, 1955–1998 // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № 1. P. L01604. <https://doi.org/10.1029/2004GL021791>
- Carton J.A., Chepurin G.A., Chen L. SODA3: a new ocean climate reanalysis // J. Climate. 2018. V. 31. № 17. P. 6967–6983. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0149.1>
- Chang Y.-S., Zhang S., Rosati A. et al. An assessment of oceanic variability for 1960–2010 from the GFDL ensemble coupled data assimilation // Clim. Dyn. 2013. V. 40. № 3–4. P. 775–803. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1412-2>
- Cheng L., Trenberth K.E., Gruber N. et al. Improved estimates of changes in upper ocean salinity and the hydrological cycle // J. Climate. 2020. V. 33. № 23. P. 10357–10381. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0366.1>
- Cheng L., Zhu J. Benefits of CMIP5 multimodel ensemble in reconstructing historical ocean subsurface temperature variation // J. Climate. 2016. V. 29. № 15. P. 5393–5416. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0730.1>

- Deser C., Phillips A., Bourdette V., Teng H.* Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability // *Clim. Dyn.* 2012. V. 38. P. 527–546. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0977-x>
- Durack P.J.* Ocean salinity and the global water cycle // *Oceanogr.* 2015. V. 28. № 1. P. 20–31. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.03>
- Durack P.J., Wijffels S.E.* Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming // *J. Climate.* 2010. V. 23. № 16. P. 4342–4362. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3377.1>
- Durack P.J., Wijffels S.E., Matear R.J.* Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000 // *Science.* 2012. V. 336. № 6080. P. 455–458. <https://doi.org/10.1126/science.1212222>
- Fedorov A.V., Pacanowski R.C., Philander S.G., Boccaletti G.* The effect of salinity on the wind-driven circulation and the thermal structure of the upper ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 2004. V. 34. № 9. P. 1949–1966. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034<1949:TEO-SOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034<1949:TEO-SOT>2.0.CO;2)
- Good S.A., Martin M.J., Rayner N.A.* EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2013. V. 118. № 12. P. 6704–6716. <https://doi.org/10.1002/2013JC009067>
- Greene C.H., Monger B.C., McGarry L.P. et al.* Recent Arctic climate change and its remote forcing of northwest Atlantic shelf ecosystems // *Oceanogr.* 2012. V. 25. № 3. P. 208–213. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.64>
- Holliday N.P., Bersch M., Berx B. et al.* Ocean circulation causes the largest freshening event for 120 years in eastern subpolar North Atlantic // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. P. 585. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14474-y>
- Huang R.X., Luyten J.R., Stommel H.M.* Multiple equilibrium states in combined thermal and saline circulation // *J. Phys. Oceanogr.* 1992. V. 22. № 3. P. 231–246. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1992\)022<0231:MESICT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1992)022<0231:MESICT>2.0.CO;2)
- Ishii M., Kimoto M., Kachi M.* Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates // *Mon. Wea. Rev.* 2003. V. 131. № 1. P. 51–73. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0051:HOSTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0051:HOSTAW>2.0.CO;2)
- Köhl A.* Evaluating the GECCO3 1948–2018 ocean synthesis — a configuration for initializing the MPI-ESM climate model // *Quart. J. Royal. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146. № 730. P. 2250–2273. <https://doi.org/10.1002/qj.3790>
- Koenker R.* Quantile Regression. Cambridge: Econometric Society Monographs, 2005. 349 p.
- Li G., Cheng L., Pan Y. et al.* A global gridded ocean salinity dataset with 0.5° horizontal resolution since 1960 for the upper 2000 m // *Front. Mar. Sci.* 2023. V. 10. P. 1108919. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1108919>
- Li G.C., Cheng L.J., Zhu J. et al.* Increasing ocean stratification over the past half century // *Nat. Clim. Chang.* 2020. V. 10. № 12. P. 1116–1123. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00918-2>
- Li Y., Fratantoni P.S., Chen C. et al.* Spatio-temporal patterns of stratification on the Northwest Atlantic shelf // *Prog. Oceanogr.* 2015. V. 134. P. 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.01.003>
- Liu Y., Cheng L., Pan Y. et al.* Climatological seasonal variation of the upper ocean salinity // *Int. J. Climatol.* 2022. V. 42. № 6. P. 3477–3498. <https://doi.org/10.1002/joc.7428>
- Mauritzen C., Melsom A., Sutton R.T.* Importance of density-compensated temperature change for deep North Atlantic Ocean heat uptake // *Nat. Geosci.* 2012. V. 5. № 12. P. 905–910. <https://doi.org/10.1038/ngeo1639>
- Melzer B.A., Subrahmanyam B.* Decadal changes in salinity in the oceanic subtropical gyres // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2017. V. 122. № 1. P. 336–354. <https://doi.org/10.1002/2016JC012243>
- Osafune S., Masuda S., Sugiura N., Doi T.* Evaluation of the applicability of the Estimated State of the Global Ocean for Climate Research (ESTOC) data set // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. № 12. P. 4903–4911. <https://doi.org/10.1002/2015GL064538>
- Polyakov I.V., Bhatt U.S., Walsh J.E. et al.* Recent oceanic changes in the Arctic in the context of long-term observations // *Ecol. Appl.* 2013. V. 23. № 8. P. 1745–1764. <https://doi.org/10.1890/11-0902.1>
- Rabe B., Karcher M., Kauker F. et al.* Arctic Ocean basin liquid freshwater storage trend 1992–2012 // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. № 3. P. 961–968. <https://doi.org/10.1002/2013GL058121>
- Rahmstorf S.* Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle // *Nature.* 1995. V. 378. № 6553. P. 145–149. <https://doi.org/10.1038/378145a0>
- Reverdin G., Friedman A.R., Chafik L. et al.* North Atlantic extratropical and subpolar gyre variability during the last 120 years: a gridded dataset of surface temperature, salinity, and density. Part 1: dataset validation and RMS variability // *Ocean Dyn.* 2019. V. 69. № 3. P. 385–403. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1240-y>
- Reverdin G., Kestenare E., Frankignoul C., Delcroix T.* Surface salinity in the Atlantic Ocean (30°S–50°N) // *Prog. Oceanogr.* 2007. V. 73. № 3–4. P. 311–340. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.11.004>

- Rhein M., Rintoul S.R., Aoki S. et al.* (2013) Observations: Ocean. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Sathyanarayanan A., Köhl A., Stammer D.* Ocean salinity changes in the global ocean under global warming conditions. Part I: Mechanisms in a strong warming scenario // *J. Climate*. 2021. V. 34. № 20. P. 8219–8236. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0865.1>
- Shi L., Alves O., Wedd R. et al.* An assessment of upper ocean salinity content from the Ocean Reanalyses Inter-comparison Project (ORA-IP) // *Clim. Dyn.* 2017. V. 49. P. 1009–1029. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2868-7>
- Stammer D., Sena Martins M., Köhler J., Köhl A.* How well do we know ocean salinity and its changes? // *Progr. Oceanogr.* 2021. V. 190. P. 102478. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102478>
- Tebaldi C., Arblaster J.M., Knutti R.* Mapping model agreement on future climate projections // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. № 23. P. L23701. <https://doi.org/10.1029/2011GL049863>
- Yamaguchi R., Suga T.* Trend and variability in global upper-ocean stratification since the 1960s // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2019. V. 124. № 12. P. 8933–8948. <https://doi.org/10.1029/2019JC015439>
- 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. № 3. P. 779–808. <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>

TRENDS IN THE SALINITY OF THE NORTH ATLANTIC WATERS ACCORDING TO OCEAN REANALYSIS DATA IN 1980–2011

© 2025 P. A. Sukhonos^{1,*}, N. A. Diansky^{2,3,4}

¹*Institute of Natural and Technical Systems, Lenina str., 28, Sevastopol, 299011 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1, bld. 2, GSP-1, Moscow, 119991 Russia*

³*Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the RAS, Gubkina str., 8, Moscow, 119333 Russia*

⁴*Zubov State Oceanographic Institute, Kropotkinskiy per., 6, bld. 1, Moscow, 119034 Russia*

*e-mail: pasukhonis@mail.ru

Long-term trends in the North Atlantic Ocean (0°–70°N, 8°–80°W) salinity are estimated from several ocean reanalyses and objective analyses over the period 1980–2011. The obtained estimates are based on the application of a nonparametric method of regression analysis (quantile regression) to the monthly ocean salinity for a quantile value of 0.5. During the period under consideration, in the latitude band 0°–15° N in the 10–50 m layer, salinity decreased by 0.17 ± 0.10 PSU. In the latitude band 20°–35° N the increase in salinity in the 10–400 m layer is 0.08 ± 0.03 PSU. In the eastern part of the Subtropical Atlantic (30°–40° N, 25°–45° W), significant salinization of the upper 400 m layer occurs in all months. This means a northwestward expansion of the high salinity region in the subtropics. In the western part of the subpolar gyre, salinity in the upper 400 m layer increased by 0.20 ± 0.05 PSU over this 32-year period.

Keywords: salinity, ocean reanalysis, quantile regression, North Atlantic