

Научная статья
УДК 551.465.4 (268.45)
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.001

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА СТРУЙ АТЛАНТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ И РАСЧЕТА ИХ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ДАННЫХ

Александра Сергеевна Булавина

*Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
bulavina@mmbi.info*

Аннотация

По результатам многолетних наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» определен диапазон колебаний температуры и солености, а также глубина распространения струй атлантических вод. На основании полученных данных разработан алгоритм поиска осевых частей струй атлантических течений на разрезе, записанный на языке R и приводимый в исполнение в программе R-Studio. Вводными для запуска алгоритма являются данные измерений температуры и солености воды на станциях стандартного разреза, полученные в рамках одной или нескольких экспедиций. Результат работы алгоритма содержит диапазон глубин распространения струй атлантической воды, их среднюю температуру и соленость.

Ключевые слова:

Баренцево море, разрез «Кольский меридиан», атлантическая вода

Original article

AN AUTOMATED ALGORITHM FOR SEARCHING FOR ATLANTIC CURRENT JETS IN THE BARENTS SEA AND CALCULATING THEIR MAIN CHARACTERISTICS IN CONDITIONS OF DATA SCARCITY

Aleksandra S. Bulavina

*Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
bulavina@mmbi.info*

Abstract

Based on the results of long-term observations at the «Kola Meridian» section, the range of temperature and salinity fluctuations, as well as the depth of propagation of Atlantic water jets, were determined. Based on this, an algorithm has been developed to search for the axial parts of Atlantic current jets in the «Kola Meridian» section. The algorithm is written in the R language and executed in the R-Studio program. The input data for launching the algorithm is data from measurements of water temperature and salinity at the stations of the section, obtained as part of one or more expeditions. The result of the algorithm contains the depth range of Atlantic water jets, their average temperature and salinity.

Keywords:

Barents Sea, «Kola Meridian» section, Atlantic water

Введение

Баренцево море – шельфовое окраинное море Северного Ледовитого океана. Оно занимает пограничное положение между Северной Атлантикой и Арктическим бассейном и играет важную роль в водообмене между ними (Никифоров, Шпайхер, 1980; On climatological ..., 2004; Махотин, Иванов, 2016). Изменения температуры, солености и объема атлантических вод, входящих в Баренцево море, оказывают влияние на океанографические условия моря (Boitsov et al., 2012; Воды ..., 2016). Увеличение притока атлантических вод в Баренцево море способствует росту температуры и солености в центральной части моря и в прибрежье Кольского полуострова (Воды ..., 2016).

На пути движения атлантических вод расположен вековой разрез «Кольский меридиан». Он является самым длинным из временных рядов наблюдений за состоянием вод Баренцева моря и удобен для наблюдения за изменениями характеристик атлантических вод и интенсивностью их проникновения в Баренцево море.

Изменения температуры и солености воды на разрезе «Кольский меридиан» используют в качестве индикатора поступления атлантических вод через западную границу Баренцева моря. Рост температуры и солености вод на разрезе, рассчитанных для условно заданного интервала глубин от поверхности до 200 м (реже до 50 или 100 м), часто рассматривается как показатель увеличения притока атлантических вод. В таком случае в интервал глубин попадает не только атлантическая вода. При таком подходе сложно определить стало ли изменение температуры и солености воды следствием изменения объема и характеристик поступающих атлантических вод или это результат влияния других факторов. Решают эту проблему подходы, основанные на оценке скоростей течений и прямого расчета объема атлантической воды, проходящей через определенный створ (Ingvaldsen et al., 2002; Соколов, Гордеева, 2018; Калавиччи, Башмачников, 2019), а также нестандартные подходы, учитывающие точное положение струй атлантической воды (Zaporozhtsev, Moiseev, 2018). При существующих методах расчета, чтобы избежать влияния сезонной изменчивости и получить сравнимые между собой средние годовые значения, необходимо иметь ежегодно данные экспедиций в каждый из сезонов года. Несмотря на регулярные наблюдения на разрезе, для проведения расчетов данных часто оказывается недостаточно, так как большая их часть относится к летнему сезону.

При изучении характеристик вод атлантических течений важно учитывать, что изменения интенсивности их отдельных струй могут происходить несинхронно, перенаправляя соль и тепло в разные районы моря. Была поставлена задача разработать и записать на языке R алгоритм, который позволил бы получить многолетние ряды изменений температуры и солености отдельных струй теплых атлантических течений на разрезе «Кольский меридиан» в условиях дефицита ежегодных всесезонных данных.

Материал и методы

В работе использованы материалы открытой базы океанографических данных (Атлас ..., 2014). Также были привлечены современные данные, полученные в ходе экспедиций Мурманского морского биологического института РАН в 2012–2023 гг.

Стандартный океанографический разрез «Кольский меридиан» расположен к северу от Кольского залива вдоль меридиана 33°30' в. д. от 69°30' до 77°00' с. ш. и включает в себя 16 станций. Этот разрез атлантические воды пересекают четырьмя крупными изолированными относительно друг друга струями теплых течений: Мурманского прибрежного, Мурманского, центральной и северной ветвями Нордкапского течения. Станции 1–3 соответствуют прибрежной ветви Мурманского течения, 4–7 – основной ветви Мурманского течения, 8–11 – центральной ветви Нордкапского течения, 12–16 – северной ветви Нордкапского течения (рис. 1).

Разработка и настройка алгоритма поиска атлантической воды на разрезе «Кольский меридиан» состояла из следующих этапов: 1) выбор теоретических основ алгоритма; 2) разработка программного кода, первичная настройка и отработка ошибок; 3) итоговая настройка алгоритма и оптимизация программного кода.

Ключевым теоретическим основанием при разработке алгоритма стало представление о водных массах океана. Осевые части струй теплых атлантических течений рассматривались как «ядро» атлантической водной массы Баренцева моря. Исходя из этого, был определен ряд частных теоретических оснований:

1. Соотношение температуры и солености является ключевым диагностическим признаком водных масс океана (Штокман, 1943; Мамаев, 1987);
2. Наиболее точно состояние водной массы может быть показано через изменение термохалинных характеристик воды в ее ядре (Штокман, 1943);
3. Ядро водной массы – это объем воды с однородными свойствами, характеризующийся минимальными градиентами основных физических характеристик (Агеноров, 1944);
4. В областях взаимодействия водных масс наблюдается увеличение плотности воды (уплотнение при смешении, вызванное нелинейностью уравнения состояния морской воды) (Зубов, Сабинин, 1958).

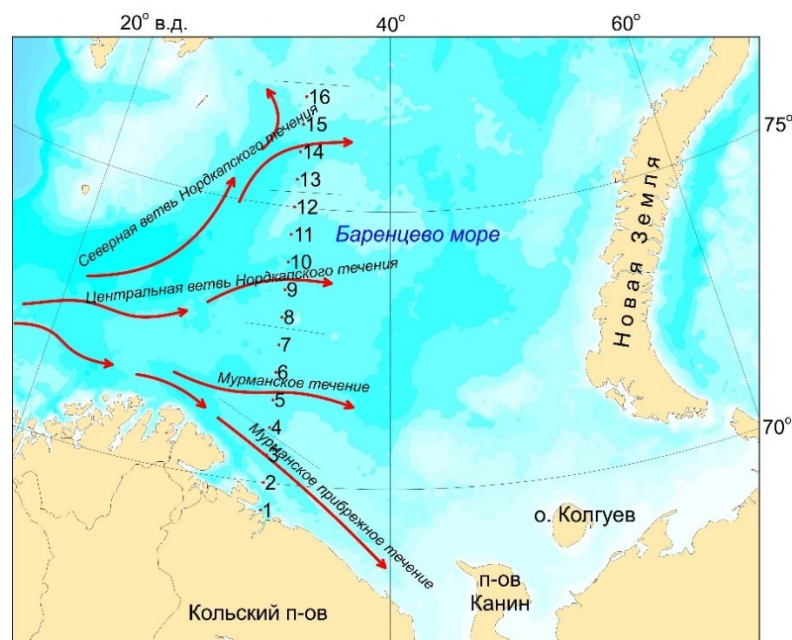


Рис. 1. Стандартный океанографический разрез «Кольский меридиан»

Fig. 1. Standard oceanographic section «Kola Meridian»

Первичный программный код был написан для работы с наиболее простым массивом натуральных данных (однородная дискретность по глубине, отсутствие пропусков). Усложнение кода для возможности работы с неоднородными и неполными данными было проведено после первичной настройки. В качестве входных данных алгоритм принимал данные о температуре и солёности воды с дискретностью по глубине 1 м, полученные для разреза «Кольский меридиан» в рамках одной или нескольких экспедиций. Результат выдачи представлял собой рассчитанные диапазоны глубин распространения атлантических вод и средние значения температуры и солёности воды для осевых частей ветвей атлантических течений в каждой из экспедиций. Алгоритм поиска учитывал такие параметры как температура, солёность и градиент плотности воды. Для «ядра» атлантической водной массы в арктических морях в работе Е. Г. Никифорова и А. О. Шпайхера (1980) приводятся следующие характеристики: температура – 2.25 °C, солёность – 34.98 ‰. Авторы также заключали слово «ядро» в кавычки, указывая на условность этого определения применительно к атлантической воде арктических морей. Разреза «Кольский меридиан» атлантическая вода достигает уже трансформированной относительно ее исходных характеристик, приводимых авторами. Кроме того, могут быть значительные межгодовые колебания с экстремальными значениями температуры и солёности. Исходя из этого, границы поиска были несколько расширены по сравнению с приведенными значениями. Алгоритм был запрограммирован искать значения температуры $T \geq 2$ °C, солёности $S \geq 34.8$ ‰. Учитывая, что ядро водной массы – это объем воды с однородными свойствами, характеризующийся минимальными градиентами основных физических характеристик (Агеноров, 1944), в качестве критерия принадлежности измерения к ядру атлантической водной массы выступали локальные минимумы вертикальных градиентов плотности. Однородным по вертикали признавался объем воды, в котором вертикальные градиенты плотности не превышали 0.0005 ед. усл. плотности/м.

При заданных условиях алгоритм выдавал ошибки, связанные с сезонным прогревом поверхности и интенсивным конвективным или ветровым перемешиванием. Кроме этого, алгоритм не мог обнаружить атлантическую воду северной ветви Нордкапского течения, так как северной части разреза атлантическая вода достигает уже значительно охлажденной. Необходимо было уточнить глубину поиска «ядра» атлантической водной массы, чтобы избежать захвата верхнего перемешанного слоя, а также дифференцировать критерии поиска для каждой из струй атлантических течений.

Согласно определению, приведенному А. Д. Добровольским (1961), водная масса должна иметь в течение длительного времени стабильные физические характеристики. Таким образом, критерием присутствия атлантической воды можно считать постоянство температурных и соленостных характеристик в течение всего года независимо от сезонных процессов. Для каждой станции разреза были рассчитаны средние сезонные значения температуры и солености по глубине с дискретностью 1 м за 2012–2023 гг. Проведено сравнение сезонных профилей указанных характеристик и найдены участки, где сезонные различия температуры воды не превышали 0.5°C , а солености – 0.05 psu. Это позволило выделить три изолированных области проникновения атлантических вод в Баренцево море, соответствующие северной и центральной ветвям Нордкапского течения, а также Мурманскому течению. В районе Мурманского прибрежного течения сезонная изменчивость оказалась слишком велика, чтобы поступающие атлантические воды сохраняли свою идентичность в течение всего года (рис. 2).

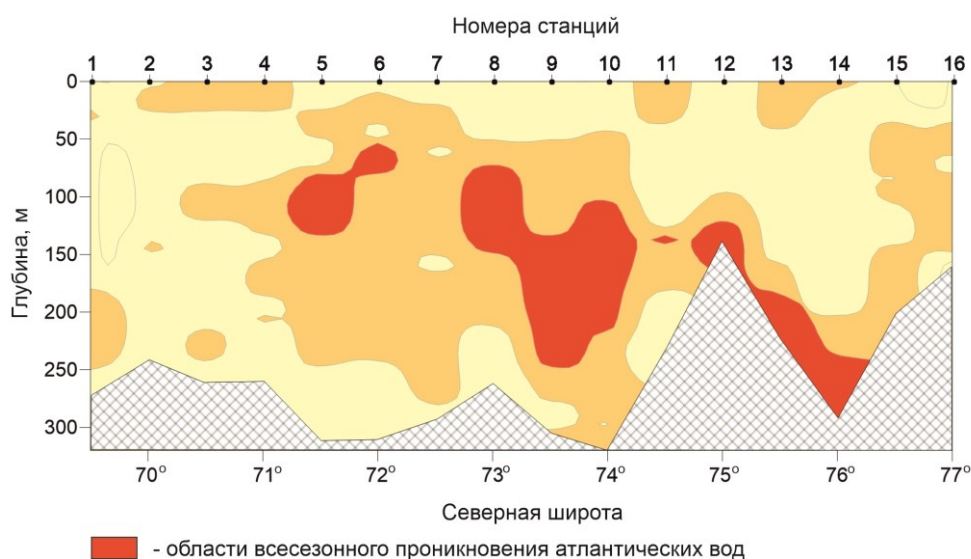


Рис. 2. Области постоянного проникновения атлантических вод в Баренцево море на разрезе «Кольский меридиан» (2012–2023 гг.)

Fig. 2. All-season areas of Atlantic water penetration into the Barents Sea in the «Kola Meridian» section (2012–2023)

Были определены участки и глубины, на которых струи атлантической воды сохраняют стабильные характеристики в течение всех сезонов года. Для каждой из областей проникновения атлантических вод были рассчитаны средние значения температуры и солености (табл. 1). Полученные глубины совпадают с диапазоном таковых расположения ядер атлантической воды, указанным для разреза «Кольский меридиан» в работе М. С. Махотина и В. В. Иванова (2016).

В алгоритм идентификации был добавлен дифференцированный по станциям учет глубины, температуры и солености воды. С учетом возможных межгодовых колебаний температуры и солености границы поиска по температуре и солености были расширены по сравнению с минимальными и максимальными значениями, приведенными в табл. 1. Требования к градиенту плотности остались без изменений – ≤ 0.0005 ед. усл. плотности/м. Итоговые настройки алгоритма приведены в табл. 2.

После уточнения критериев поиска в алгоритм была добавлена возможность работы с данными различной дискретности по глубине. При отсутствии дискретности данных в 1 м алгоритм интерполировал температуру и соленость по глубине между имеющимися значениями и только после этого выполнял поиск осевых частей струй атлантической воды. В случае необходимости интерполяции в результате выдачи присутствовало указание, что данные были интерполированы.

Таблица 1

**Средние характеристики осевых частей струй атлантических течений
на разрезе «Кольский меридиан» (2012–2023 гг.)**

Table 1

Average characteristics of the axial parts of Atlantic current jets in the «Kola Meridian» section (2012–2023)

Течение	Температура, °C	Соленость, psu	Глубина, м
Мурманское	4.59 ± 0.19 4.04 – 5.38	34.81 ± 0.11 34.63 – 34.93	55–135
Нордкапское центральная ветвь	2.98 ± 0.34 1.46 – 3.95	34.99 ± 0.01 34.95 – 35.01	75–250
северная ветвь	1.34 ± 0.29 0.23 – 2.05	34.98 ± 0.10 34.95 – 35.00	120–240

ПРИМЕЧАНИЕ. Числитель – среднее значение±стандартное отклонение, знаменатель – минимальное и максимальное значения.

Таблица 2

Требования к поиску осевых частей струй атлантических течений на разрезе «Кольский меридиан»

Table 2

Requirements for the search of axial parts of Atlantic current jets in the «Kola Meridian» section

Течение	Станции разреза	Температура, °C	Соленость, psu	Глубина, м	Градиент плотности, ед. усл. плотности/м
Мурманское	4–7	≥ 3.5	≥ 34.6	55–135	≤ 0.0005
Нордкапское центральная ветвь	8–11	≥ 1	≥ 34.9	75–250	≤ 0.0005
северная ветвь	12–16	≥ 0	≥ 34.9	120–240	≤ 0.0005

Результаты и обсуждение

При помощи алгоритма были рассчитаны глубины прохождения струй Мурманского и Нордкапского течений с 1980 по 2023 гг., а также средние годовые значения температуры и солености воды в их осевых частях. Была выполнена проверка того, как после итоговой настройки алгоритм справляется с определением глубины залегания «ядра» атлантической воды. В пределах найденного диапазона глубин алгоритм рассчитывает остальные параметры, и ошибка в глубине может сказаться на результатах расчета температуры и солености. Согласно настройкам, алгоритм не может вести поиск «ядра» за пределами диапазона глубин, для которых эмпирически было установлено отсутствие сезонных колебаний температуры и солености (табл. 2). Результат выдачи никогда не выйдет за пределы заложенного в настройках диапазона глубин, но может быть сужен по итогам проверки остальных параметров поиска. Ограничение было введено, чтобы получать характеристики струй атлантических вод очищенными от сезонной составляющей. Это дает возможность характеризовать межгодовые изменения при отсутствии ежегодных всесезонных данных. Вместе с тем, подобного рода ограничение может приводить к тому, что алгоритм выведет из расчета часть данных, относящихся к «ядру» атлантической водной массы только по причине несоответствия глубины.

Для проверки работы алгоритма были использованы данные 48 экспедиций, полученные на разрезе «Кольский меридиан». В 24 массивах экспедиционных данных дискретность измерения температуры и солености составила 1 м, параметры не требовали интерполяции, в 24 массивах параметры были определены только на стандартных горизонтах и алгоритм заполнил пробелы посредством интерполяции. По данным каждой экспедиции вертикальные границы атлантической водной массы были определены при помощи классического *TS*-анализа, а затем внутри этих границ

выделены осевые части струй атлантической воды по критерию минимального градиента плотности. Результаты ручного расчета и работы алгоритма были сопоставлены. Аналогично терминологии, используемой при проверке статистических гипотез, ошибкой второго рода считались ситуации, когда алгоритм ошибочно пропускал наличие атлантической воды на некоторых глубинах. Ситуации, когда алгоритм находил атлантическую воду при ее отсутствии, считались ошибкой первого рода. Ошибки первого рода не были выявлены. Вероятно, их отсутствие стало возможным благодаря очень жестким требованиям к физическим характеристикам атлантической воды. Ошибки второго рода составляли 13 % от общего числа случаев определения и связаны с ограничением глубин поиска атлантической воды. Алгоритм определял факт наличия атлантической воды, но не брал в расчет часть данных из-за установленных ограничений по глубине поиска. При возникновении ошибки второго рода в 89 % случаев она была связана с определением верхней границы «ядра» атлантической водной массы и в 11 % случаев – нижней ее границы. При возникновении ошибки расхождение в глубине с результатом классического *TS*-анализа не превышало 20 м (табл. 3). Ошибочный вывод из расчета части данных не оказывал значимого влияния на получаемые расчетные величины температуры и солёности, так как искомые области – это участки с минимальными градиентами физических характеристик.

Таблица 3

Усредненные величины расхождения результатов работы алгоритма и классического *TS*-анализа

Table 3

The average values of the discrepancy between the results of the algorithm and the classical *TS*-analysis

Параметр	Мурманское течение	Нордкапское течение	
		центральная ветвь	северная ветвь
Верхняя граница «ядра» атлантической водной массы, м	14.77	11.24	7.47
Нижняя граница «ядра» атлантической водной массы, м	5.34	5.21	0.74
Средняя температура воды в «ядре», °C	0.002	0.001	0.001
Средняя солёность воды в «ядре», psu	0.0001	0.0001	0.0001

Современных исследований, в которых были выполнены расчеты температуры и солёности для отдельных струй атлантических течений, крайне мало. В работе А. Г. Трофимова (2021) приведены аномалии температуры и солёности воды на разрезе «Кольский меридиан» (основная ветвь Мурманского течения), рассчитанные для слоя 0–200 м. Полученные нами ряды температуры и солёности осевой части струи Мурманского течения были использованы для составления рядов аномалий.

Аномалии были рассчитаны аналогично работе А. Г. Трофимова (2021) относительно 1981–2010 гг. и сопоставлены с представленными. Эти данные не могут подлежать прямому сравнению, так как слой от 0 до 200 м захватывает струю атлантических вод, но также он захватывает поверхностный слой и иногда придонные воды. Значимой корреляции между рядами аномалий температур не было обнаружено, однако долгосрочные тенденции были схожи. Принятые к сопоставлению ряды аномалий температуры воды имели тенденцию к увеличению, а с начала XXI века положительные аномалии температуры воды стали преобладать над отрицательными. В многолетнем ходе аномалий солёности атлантических вод А. Г. Трофимов (2021) выделил три периода: 1981–2011 гг. – увеличение солёности, 2011–2016 гг. – снижение солёности, 2016–2020 гг. – фиксация солёности на низком уровне. В ряду аномалий, рассчитанном по результатам работы алгоритма, указанные периоды не могут быть выделены. В работе А. Г. Трофимова (2021) средние характеристики атлантических вод испытывали влияние изменчивости характеристик включенного в расчеты поверхностного слоя, в то время как результат работы алгоритма исключает такое влияние. Таким образом, причиной несоответствия полученных нами и опубликованных данных (Трофимов, 2021) могут быть значительные колебания солёности поверхностного слоя, связанные с колебаниями речного стока и испарения.

Средняя годовая температура воды ветвей атлантических течений в слоях 0–50 и 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» используется в Полярном филиале ФГБУН «ВНИРО» (ПИНРО) для анализа колебаний температуры атлантической воды Баренцева моря. Данные о температуре воды в районах прохождения Мурманского прибрежного, Мурманского и центральной ветви Нордкапского течений, рассчитанные для слоев 0–50 и 0–200 м, представлены на сайте (<http://www.pinro.vniro.ru/ru/>, 15.07.2021). Температура воды в районах прохождения вышеуказанных течений в 1980–2020 гг. имела статистически значимый положительный тренд как в слое 0–50 м, так и в слое 0–200 м. Рост температуры в этих слоях происходил с почти одинаковой интенсивностью, но большей, чем повышение температуры осевых частей струй атлантических вод, рассчитанное по данным алгоритма. Это может свидетельствовать о том, что значительную роль в повышении температуры вод Баренцева моря, наряду с прямым влиянием увеличения адвективного потока тепла атлантических течений, играют и другие факторы. Вероятно, важным в повышении температуры вод Баренцева моря по всей толще является реализация обратных связей в системе океан–атмосфера. В последние десятилетия наблюдается существенный рост температуры воздуха и сокращение площади льдов в Баренцевом море (Ingvaldsen et al., 2002; Boitsov et al., 2012; Трофимов и др., 2018).

В работе А. А. Соколова и С. М. Гордеевой (2018) был рассчитан адвективный поток тепла, поступающий с атлантической водой через меридиональный разрез по 16.5° в. д. в бассейн Баренцева моря за 1980–2015 гг. В расчетах учитывалась как температура воды, так и объем воды, прошедший через исследуемый створ. Было выделено три струи атлантических вод и рассчитан поток тепла, поступающий в Баренцево море с каждой из них. Южная струя находится у побережья Норвегии на 69.5–71.5° с. ш. Второй (центральный) поток расположен в зоне 72–74° с. ш. и распространяется вдоль Медвежинского желоба. Самая северная струя располагается на 74.5–76° с. ш. в Зюйдкапском желобе. Авторы показали, что на меридиональном разрезе положительные тренды теплового потока присутствуют во всех трех струях. Положительные тренды потока тепла в центральной и северной струях в период наблюдений были обусловлены увеличением как скорости течений, так и ростом температуры воды. Поток воды, проходящий через южную часть разреза, напротив, ослабел с 1980 по 2015 гг. Поток тепла с южной струей при этом не снизился за счет повышения температуры воды. Авторы приводят величины трендов температуры для каждой из струй. Южная струя, двигаясь на восток, образует прибрежное Мурманское и Мурманское течения, а центральная разделяется на центральную и северную ветви Нордкапского течения. Тренды температуры воды, полученные по данным работы алгоритма на разрезе «Кольский меридиан» для Мурманского и центральной ветви Нордкапского течения, значимы и близки к приведенным для южной и центральной струй на разрезе по 16.5° в. д. Тренд температуры воды северной ветви Нордкапского течения незначим. Причиной этого могло стать влияние сложного взаимодействия различных типов вод в этой области.

Заключение

Разработан специальный алгоритм поиска струй атлантических течений на разрезе «Кольский меридиан», записанный на языке R и приводимый в исполнение в программе R-Studio. Результаты выдачи не имеют значимых расхождений с таковыми, получаемыми вручную при помощи классического *TS*-анализа. Достоинством алгоритма является возможность рассчитывать средние годовые значения температуры и солёности осевых частей струй атлантических течений при наличии данных всего одной экспедиции в году.

Были определены средние годовые температура и солёность осевых частей струй Мурманского и Нордкапского течений в 1980–2023 гг. Полученные данные не подлежат прямому сравнению с традиционно рассчитываемыми температурой и солёностью слоя 0–200 м, а также с данными о колебаниях адвективного теплового потока струй атлантических течений. Однако, основные тенденции в изменении температуры и солёности струй атлантических течений, полученные по результатам работы алгоритма, соответствуют тенденциям, установленным другими методами.

Работа выполнена по теме «Структурно-динамические трансформации морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды» (№ госрегистрации 124013000709-9) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Агеноров В. К. Об основных водных массах в гидросфере // Изв. АН СССР. Сер. географическая и геофизическая. 1944. Т. 8, № 6. С. 359–380.
2. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013) / Г. Г. Матишов, С. В. Бердников, А. П. Жичкин и др. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. 256 с.
3. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В. К. Ожигин, В. А. Ившин, А. Г. Трофимов, А. Л. Карсаков, М. Ю. Анциферов. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2016. 260 с.
4. Добровольский А. Д. Об определении водных масс // Океанология. 1961. Т. 1, № 1. С. 12–24.
5. Zubov N. N., Sabinin K. D. Вычисление уплотнения при смешении морских вод. М.: Гидрометеиздат, 1958. 37 с.
6. Калавиччи К. А., Баимачников И. Л. К механизму положительной обратной связи долгосрочной изменчивости конвергенции океанических и атмосферных потоков тепла и площади ледяного покрова в Баренцевом море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55(6). С. 640–649. URL: <https://doi.org/10.31857/S0002-3515556171-181>
7. Мамаев О. И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 296 с.
8. Махотин М. С., Иванов В. В. Распространение атлантических водных масс в Баренцевом море по данным наблюдений и численного моделирования // Тр. Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 169–191.
9. Никифоров Е. Г., Шнайхер А. О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 269 с.
10. Соколов А. А., Гордеева С. М. Изменение адвекции тепла в Баренцево море // Российская Арктика. 2018. № 4. С. 34–45. URL: <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00004>
11. Трофимов А. Г. Современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря // Тр. ВНИРО. 2021. Т. 186, № 4. С. 101–118. URL: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-186-101-118>
12. Трофимов А. Г., Карсаков А. Л., Ившин В. А. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека // Тр. ВНИРО. 2018. Т. 173. С. 79–91. URL: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2018-173-79-91>
13. Штокман В. Б. Основы теории TS-кривых как метода изучения перемешивания и трансформации водных масс моря // Проблемы Арктики. 1943. № 1. С. 32–71.
14. Boitsov V. D., Karsakov A. L., Trofimov A. G. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. Mar. Sci. 2012. Vol. 69, № 5. P. 833–840. URL: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss075>
15. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s / R. Ingvaldsen, H. Loeng, G. Ottersen, B. Adlandsvik // ICES Mar. Sci. Symp. 2003. Vol. 219. P. 160–168.
16. Ingvaldsen R., Loeng H., Asplin L. Variability in the Atlantic inflow to the Barents Sea based on a one-year time series from moored current meters // Cont. Shelf Res. 2002. Vol. 22. P. 505–519. URL: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00070-X)
17. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation / W. Maslowski, D. Marble, W. Walczowski, U. Schauer, J. L. Clement, A. J. Semtner // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109, Article: C03032. URL: <https://doi.org/10.1029/2001JC001039>
18. Zaporozhtsev I., Moiseev D. Calculation of atlantic waters inflow and polar front position in the Barents Sea with long-term data on Kola Transect: 2018 4th International Symposium on Geoinformatics (Malang, 10–12 November 2018). Malang, Indonesia, 2018. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/ISYG.2018.8611861>

References

1. Agenorov V. K. Ob osnovnykh vodnykh massakh v gidrosfere [About the main water masses in the hydrosphere]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya* [Izvestiya of the USSR Academy of Sciences. Geographical and geophysical series], 1944, Vol. 8, No. 6, pp. 359–380 (In Russ.).
2. Matishov G. G., Berdnikov S. V., Zhichkin A. P. et al. *Atlas klimaticheskikh izmeneniy v bol'shikh morskikh ekosistemakh Severnogo polushariya (1878–2013)* [Atlas of climate change in large marine ecosystems of the Northern Hemisphere (1878–2013)]. Rostov-on-Don, Publ. SSC RAS, 2014, 256 p. (In Russ.).
3. Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G., Karsakov A. L., Antsiferov M. Yu. *Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost'* [Waters of the Barents Sea: structure, circulation, variability]. Murmansk, Publ. PINRO, 2016, 260 p. (In Russ.).
4. Dobrovol'skiy A. D. Ob opredelenii vodnykh mass [On the determination of water masses]. *Okeanologiya* [Oceanology], 1961, Vol. 1, No. 1, pp. 12–24 (In Russ.).
5. Zubov N. N., Sabinin K. D. *Vychislenie uplotneniya pri smeshenii morskikh vod* [Calculation of compaction during mixing of seawater]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1958, 37 p. (In Russ.).
6. Kalavichchi K. A., Bashmachnikov I. L. K mekhanizmu polozhitel'noy obratnoy svyazi dolgosrochnoy izmenchivosti konvergentsii okeanicheskikh i atmosferykh potokov tepla i ploshchadi ledyanogo pokrova v Barentsevom more [On the mechanism of a positive feedback in long-term variations of the convergence of oceanic and atmospheric heat fluxes, and the ice cover in the Barents Sea]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya RAS. Atmospheric and ocean physics], 2019, Vol. 55(6), pp. 640–649 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.31857/S0002-3515556171-181>
7. Mamaev O. I. *Termokhalinnyy analiz vod Mirovogo okeana* [Thermohaline analysis of the waters of the World Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 296 p. (In Russ.).
8. Makhotin M. S., Ivanov V. V. Rasprostranenie atlanticheskikh vodnykh mass v Barentsevom more po dannym nablyudeniya i chislennogo modelirovaniya [Distribution of atlantic water masses in the Barents Sea according to observations and numerical modeling]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii* [Transactions of the Hydrometeorological Research Center of Russian Federation], 2016, No. 361, pp. 169–191 (In Russ.).
9. Nikiforov E. G., Shpaykher A. O. *Zakonomernosti formirovaniya krupnomasshtabnykh kolebaniy gidrologicheskogo rezhima Severnogo Ledovitogo okeana* [Patterns of formation of large-scale fluctuations in the hydrological regime of the Arctic Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980, 269 p. (In Russ.).
10. Sokolov A. A., Gordeeva S. M. Izmenenie adveksii tepla v Barentsevo more [Change of heat advection to the Barents Sea]. *Rossiyskaya Arktika* [The Russian Arctic], 2018, No. 4, pp. 34–45 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00004>
11. Trofimov A. G. Sovremennye tendentsii izmeneniya okeanograficheskikh usloviy Barentseva morya [The current trends in oceanographic conditions of the Barents Sea]. *Trudy VNIRO* [Transactions of VNIRO], 2021, Vol. 186, No. 4, pp. 101–118 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-186-101-118>
12. Trofimov A. G., Karsakov A. L., Ivshin V. A. Izmeneniya klimata v Barentsevom more na protyazhenii poslednego poluveka [Climate changes in the Barents Sea over the last half century]. *Trudy VNIRO* [Transactions of VNIRO], 2018, Vol. 173, pp. 79–91 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2018-173-79-91>
13. Shtokman V. B. Osnovy teorii TS-krivyykh kak metoda izucheniya peremeshivaniya i transformatsii vodnykh mass morya [Fundamentals of the theory of TS-curves as a method for studying mixing and transformation of sea water masses]. *Problemy Arktiki* [Problems of the Arctic], 1943, No. 1, pp. 32–71 (In Russ.).

14. Boitsov V. D., Karsakov A. L., Trofimov A. G. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009. ICES J. Mar. Sci., 2012, Vol. 69, No. 5, pp. 833–840. Available at: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss075>
15. Ingvaldsen R., Loeng H., Ottersen G., Adlandsvik B. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s. ICES Mar. Sci. Symp., 2003, Vol. 219, pp. 160–168.
16. Ingvaldsen R., Loeng H., Asplin L. Variability in the Atlantic inflow to the Barents Sea based on a one-year time series from moored current meters. Cont. Shelf Res., 2002, Vol. 22, pp. 505–519. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00070-X)
17. Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J. L., Semtner A. J. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation. J. Geophys. Res., 2004, Vol. 109, Article: C03032. Available at: <https://doi.org/10.1029/2001JC001039>
18. Zaporozhtsev I., Moiseev D. Calculation of atlantic waters inflow and polar front position in the Barents Sea with long-term data on Kola Transect: 2018 4th International Symposium on Geoinformatics (Malang, 10–12 November 2018). Malang, Indonesia, 2018, pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.1109/ISYG.2018.8611861>

Информация об авторе

Александра Сергеевна Булавина – кандидат географических наук, старший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-1173-9324>

Information about the author

Aleksandra S. Bulavina – PhD (Geography), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1173-9324>

Статья поступила в редакцию 09.04.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 05.05.2025.
The article was submitted 09.04.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 05.05.2025.