© Лыжков Д. А., Журбас Н. В., Кузьмина Н. П., 2023, Океанологические исследования, 2023, Том 51, № 1, С. 36–53

УДК 551.465 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).2

АНАЛИЗ *T*, *S*-АНСАМБЛЕЙ АТЛАНТИЧЕСКОЙ ВОДНОЙ МАССЫ ЕВРАЗИЙСКОГО БАССЕЙНА АРКТИКИ С ПОМОЩЬЮ КЛАСТЕРНОГО МЕТОДА

Д. А. Лыжков, Н. В. Журбас, Н. П. Кузьмина

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36,
e-mail: kuzmina@ocean.ru, dlyzhkov@gmail.com

Для кластерного анализа использовались CTD-данные зондирований вод Евразийского бассейна, выполненные в рамках программы NABOS (Nansen and Amundsen Basins Observing System) в 2002–2015 гг. Для расчетов применялся наиболее популярный метод кластеризации, а именно метод *k*-средних. Рассматривались два случая: разделение на два и три кластера. Выделенные кластеры, которые объединяли точки на θ, *S*-диаграммах (θ, *S* – потенциальная температура и соленость соответственно), удовлетворительно соответствовали θ, *S*-значениям Фрамовской и Баренцевоморской ветвям Атлантических вод (АВ). Для каждого кластера вычислялись термохалинные характеристики центроидов (центров кластеров), то есть средние значения одновременно температуры, солености и потенциальной плотности каждой водной массы. Термохалинные характеристики центроидов, оцененные по имеющимся данным, полученным в различные годы наблюдения, представлялись в θ, *S*-координатах и θ, σ-координатах (σ – потенциальная плотность). Дополнительно строились зависимости температуры, солености и потенциальной плотности центроидов от года наблюдения. Итоговые результаты позволили получить оценки средних термохалинных характеристик АВ в разные годы наблюдения и изменчивость этих оценок от года к году. В частности получено, что значения средних термохалинных характеристик АВ свидетельствовали о сильном потеплении и осолонении АВ в 2006–2009 гг. (на разрезах вдоль 126° в. д.), причем отклик на потепление наблюдался во всех кластерах АВ. Дана интерпретация полученных результатов. Рассмотрены подходы к выбору наиболее оптимального метода кластерного анализа. Представлены результаты оценки влияния диапазонов изменчивости температуры и солености в анализируемых CTD-данных на точность определения центроидов.

Ключевые слова: ветви Атлантической воды, *T*, *S*-ансамбли, кластеры, определение средних *T*, *S*-значений водных масс

1. Введение

Кластерный анализ *T*, *S*-ансамблей, полученных на основе CTD-зондирований вод океана, позволяет определять группы *T*, *S*-значений, для каждой из которых температура и соленость близки по величине, но имеют существенные различия со значениями температуры и солености любой другой группы. Данный метод анализа может быть полезен для выделения и/или классификации водных масс в океане, исследования влияния климата на структуру водных масс, а также для оценок трансформации значений температуры и солености вследствие перемешивания.

Настоящая работа посвящена анализу термохалинных особенностей структуры Атлантической воды (АВ), которая поступает в Евразийский бассейн Арктики через пролив Фрама (Фрамовская ветвь АВ) и желоб Святой Анны (Баренцевоморская ветвь АВ) (см., например, (Aagaard, 1981; Rudels, 1994; Schauer et al., 1997; Rudels et al., 1999; Schauer et al., 2022a; Schauer et al., 2022b; Rudels, 2006; Beszczynska-Möller et al., 2012; Иванов, Аксенов, 2013; Rudels et al., 2015; Dmitrenko et al., 2015)). Конкретная задача исследования сводится к следующему. На основе CTD-разрезов, выполненных в рамках программы NABOS (Nansen and Amundsen Basins Observing System), провести анализ *T*, *S*-ансамблей для диапазона глубин «залегания» АВ (Walsh et al., 2007; Rudels, 2015; Pnyushkov et al., 2015; Журбас, 2019; Zhurbas, Kuzmina, 2020) с помощью кластерного метода с целью описания изменения термохалинной структуры АВ, оценки средних значений одновременно температуры, солености и потенциальной плотности АВ и анализа изменчивости полученных средних значений в зависимости от года наблюдения.

В работе также уделяется внимание обсуждению подходов к выбору наиболее оптимального метода кластерного анализа для используемых CTD-данных.

2. О методе кластерного анализа

В настоящей работе использовался наиболее популярный метод кластеризации, а именно метод *k*-средних (метод *k*-means). Алгоритм метода следующий. На основе физических соображений (или умозрительно) выдвигается предположение о количестве кластеров на анализируемой *T*, *S*-диаграмме. Задание количества кластеров является входным параметром алгоритма. На первой итерации выделения кластеров произвольно выбираются точки центров кластеров. Далее для каждой точки *T*, *S*-ансамбля определяется принадлежность *T*, *S*-точки к тому или иному кластеру на основе оценивания «длины вектора» от точки на *T*, *S*-диаграмме до центров кластеров. На следующем этапе происходит поиск «центров масс» выделенных кластеров по заданной метрике, и затем ранее определенные центры кластеров переносятся в найденные центры масс. Процедура пересчета кластеров и их центров повторяется до тех пор, пока принадлежность каждой *T*, *S*-точки к кластеру не будет изменяться.

Представленное описание кластеризации основано на предположении, что каждая точка на *T*, *S*-диаграмме характеризуется только температурой и соленостью. Однако, естественно, что каждая такая точка характеризуется еще и потенциальной плотностью. В настоящей работе мы рассмотрели два варианта разбиения на кластеры: 1) каждая точка на *T*, *S*-диаграмме характеризуется только температурой и соленостью; 2) каждая точка ансамбля зависит от температуры, солености и потенциальной плотности. Описания двух методов кластеризации аналогичны. Различие обусловлено размерностью пространства признаков объекта или, в данном случае, признаков (характеристик) водной массы. Для первого варианта метрика

«длины» зависит от двух параметров (температура, соленость), для второго варианта она определяется тремя параметрами (температура, соленость, потенциальная плотность).

Как уже говорилось выше, количество кластеров является входным параметром задачи. Мы рассмотрели два случая: разделение на два и три кластера. Разделение на два кластера мотивировалось тем, что АВ после слияния Фрамовской ветви АВ (ФВАВ) и Баренцевоморской ветви АВ (БВАВ) включает в себя две различные водные массы (см., например, (Schauer et al., 2002a; Schauer et al., 2002b; Rudels, 2015; Zhurbas, Kuzmina, 2020)). Разделение на три кластера также целесообразно, если предположить, что между различными водными массами существует перемешивание.

3. Результаты кластерного анализа

Для кластерного анализа использовались CTD-данные зондирований вод Евразийского бассейна, полученные летом–осенью в различные годы вдоль 126° в. д. и в зоне, перпендикулярной склону между 101° в. д. и 112° в. д. (см. карту на рисунке 1). Все разрезы, попавшие в эту зону, мы будем обозначать как разрезы вблизи 103° в. д. Данная долгота определяет центральную часть небольшой области вдоль линии склона, в пределах которой проходили разрезы. Годы измерений вблизи 103° в. д.: 2005, 2006, 2008, 2009, 2013 гг.; годы измерений вдоль 126° в. д.: 2002–2009 гг., 2013, 2015 гг.

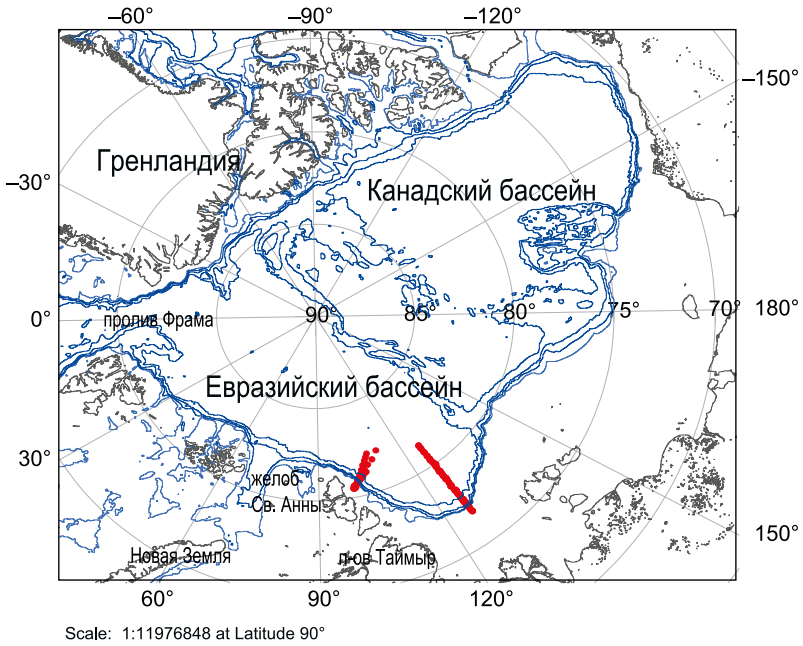

Рис. 1 – Расположение CTD-зондирований (красные точки), которые использовались для кластерного анализа. Синие линии – изобаты: 2000 м, 1000 м, 500 м и 300 м

Определения кластеров проводились для рядов потенциальной температуры, θ (°C), солености, *S* (епс), потенциальной плотности, σ (кг/м^3). Потенциальная температура и потенциальная плотность рассчитывались от нулевого горизонта. Диапазон глубин CTD-данных изменялся от 200 м до H, где H – максимальная глубина зондирования, то есть из рассмотрения исключался верхний слой, в котором, как правило, наблюдаются низкие температуры.

Метрика «длины» (или «длина вектора») в методе *k*-средних, которая, например, в частном случае зависимости каждой точки на θ, *S*-диаграмме только от температуры и солености является безразмерной величиной, определяется согласно следующему соотношению: $D_i = \left((\theta_i^* - \theta_c^*)^2 + (S_i^* - S_c^*)^2\right)^{0.5}$, где $\theta_i^* = \theta_i / (1\ °C)$, $S_i^* = S_i / (1$ епс), θ_c^* и S_c^* – безразмерные «координаты» центроида (центра кластера). Таким образом, CTD-значения температуры, солености, потенциальной плотности, для которых определялись кластеры, сводились к безразмерным значениям благодаря нормировке. При представлении результатов анализа мы будем использовать во всех случаях размерные значения потенциальной температуры, солености и потенциальной плотности.

3.1. Результаты обработки θ*, S-рядов*

На рисунке 2 представлены θ, *S*-ансамбли, построенные по CTD-данным, полученным в 2006 г. на разрезах вблизи 103° в. д. и вдоль 126° в. д. На рисунках 2а и 2в даны разбиения на 2 кластера. Для удобства введем обозначения: кластер 1 (выделен красным цветом) характеризуется высокими температурами, кластер 2 (выделен синим цветом) включает точки на диаграммах с температурами ниже нуля градусов. При разделении ансамблей на три кластера (рисунки 2б и 2г) количество точек в кластерах 1 и 2 уменьшается за счет кластера 3 (обозначен серым цветом), в который попадают точки с температурами от 0 °C до ~1 °C.

Разбиение на кластеры, представленное на рисунке 2, подчеркивает, по мнению авторов, существующее различие в определениях ФВАВ и БВАВ. Так, согласно работам (Schauer et al., 1997; Schauer et al., 2002a; Schauer et al., 2002b) к водам БВАВ следует относить не только холодные воды с температурой ниже 0 °C, но и воды с температурой до 1 °C. Однако согласно (Dmitrenko et al., 2015) температура БВАВ лишь незначительно может превышать 0 °C (подробнее см. обсуждение в (Zhurbas, Kuzmina, 2020)). В работах (Walsh et al., 2007; Pfirman et al., 1994) предложено определение ФВАВ и БВАФ, отличающееся от определений перечисленных работ: к водным массам ФВАВ следует относить воды с температурой больше 0 °C, а температура водных масс БВАВ лежит в строгом диапазоне изменчивости от – 2 °C до 0 °C (см. также обсуждение в (Zhurbas, Kuzmina, 2020)).

Математический подход к разделению θ, *S*-ансамблей в данных случаях на два кластера удовлетворительно согласуется с определением ФВАВ и БВАВ в работах (Schauer et al., 1997; Schauer et al., 2002a; Schauer et al., 2002b): к кластеру 1 можно отнести воды ФВАВ, к кластеру 2 – воды БВАВ.

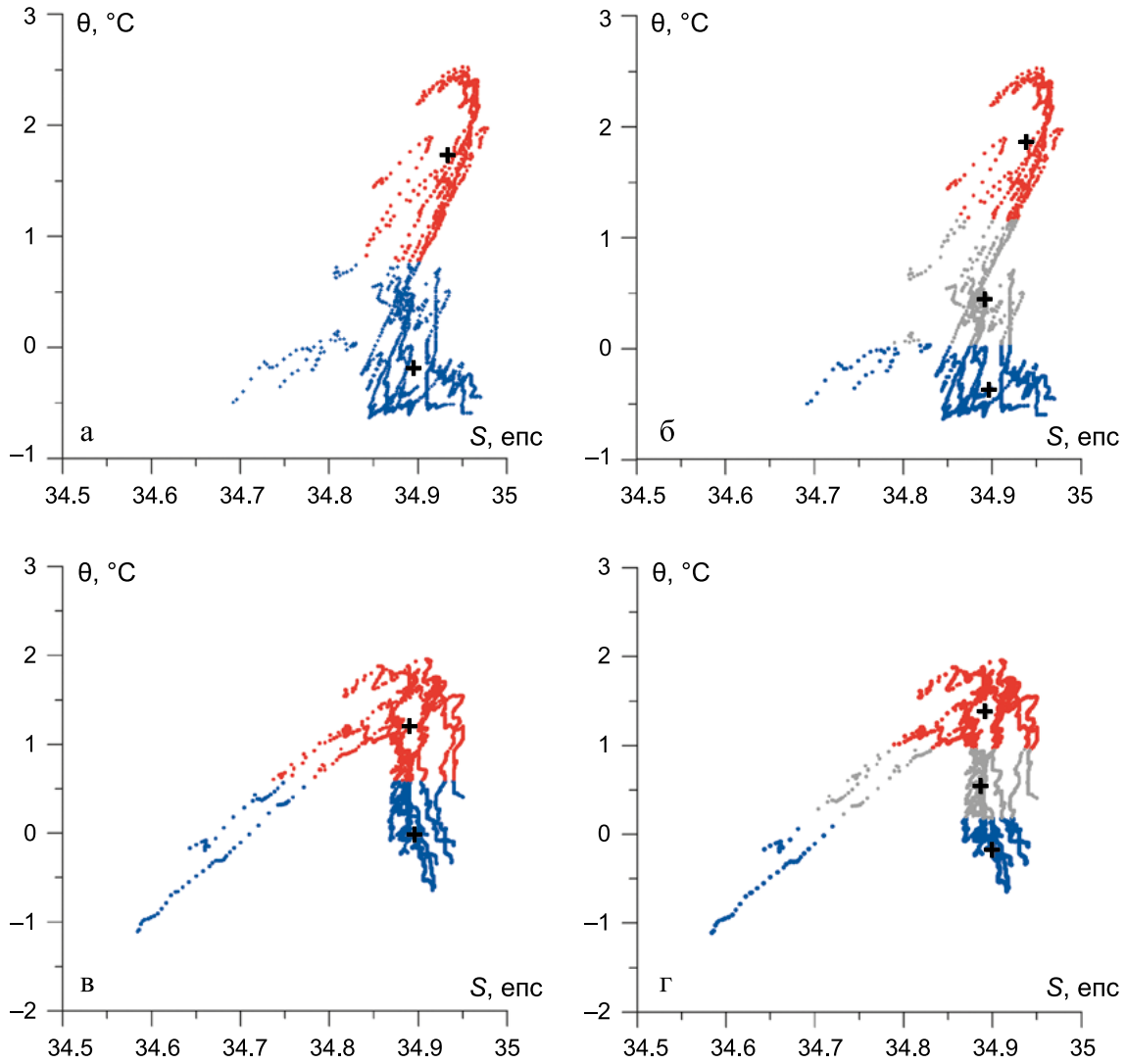

Рис. 2 – Кластеры θ, *S*-ансамблей, построенные по CTD-данным, полученным в 2006 г. на разрезах вблизи 103° в. д. (**а**, **б**) и вдоль 126° в. д. (**в**, **г**). Кластеры обозначены разными цветами; два кластера (**а**, **в**), три кластера (**б**, **г**). Крестиками обозначены расположения центроидов (центров кластеров)

Разделение на три кластера ближе к определениям вод ФВАВ и БВАВ, которые даны в работах (Dmitrenko et al., 2015; Walsh et al., 2007; Pfirman et al., 1994): кластеры 1 и 3 – воды ФВАВ, кластер 2 – воды БВАВ. Однако, наиболее вероятно, согласно инструментальным измерениям (Schauer et al., 1997; Dmitrenko et al., 2015) (см. также обсуждение в работе (Zhurbas, Kuzmina, 2020)), что воды от 0 °C до 1 °C (кластер 3) могут быть как водами БВАВ, так и водами ФВАВ, или же водами, которые возникают при смешении двух ветвей АВ вследствие, например, вертикального перемешивания и/или диапикнического перемешивания (Иванов, Аксенов, 2013), а также интрузионного расслоения (Rudels et al., 1999; Kuzmina et al., 2011; Кузьмина, 2016; Журбас, 2018).

Крестиками на рисунке 2 показаны расположения центроидов (центров кластеров). Значения температуры и солености центроида являются наиболее вероятными

средними значениями одновременно температуры и солености кластера, или средними значениями температуры и солености выделенной кластером водной массы.

Значения температуры и солености центроидов, оцененные в различные годы, представлены в таблице 1. Изменчивость температуры и солености центроидов в зависимости от года наблюдения удобно анализировать, опираясь на рисунок 3.

Таблица 1 – Значения температуры и солености центроидов
в различные годы наблюдения (2 кластера)

Год измерения	**Разрезы вдоль 126° в. д.**		**Разрезы вблизи 103° в. д.**	
	***S*, епс**	**θ, °C**	***S*, епс**	**θ, °C**
2002	34.848	0.464		
	34.891	–0.572		
2003	34.861	0.741		
	34.884	–0.441		
2004	34.888	1.041		
	34.903	–0.5051		
2005	34.874	0.987	34.870	1.105
	34.897	–0.525	34.877	–0.322
2006	34.890	1.202	34.933	1.736
	34.896	–0.020	34.895	–0.189
2007	34.897	1.465		
	34.890	0.072		
2008	34.903	1.530	34.894	1.186
	34.891	0.168	34.887	–0.091
2009	34.891	1.259	34.915	1.355
	34.897	0.065	34.879	–0.249
2013	34.904	1.067	34.914	1.170
	34.908	–0.455	34.909	–0.424
2015	34.908	1.095		
	34.894	–0.328		

Как видно из рисунка 3, центроиды кластера 1 показывают сильное увеличение средней температуры и солености АВ в 2006 г. вблизи 103° в. д. и в 2006–2009 гг. вдоль 126 °E. Впервые свидетельство о начале потепления АВ в 2004 г. было опубликовано в работе (Polyakov et al., 2005). Наиболее сильное потепление наблюдалось в 2006–2008 гг. (Polyakov et al., 2011). Данное потепление АВ согласно (Polyakov et al., 2011) обусловлено изменением климата. В работах (Polyakov et al., 2011; Zhurbas, Kuzmina, 2020) было обращено внимание на то, что потепление АВ вдоль 126° в. д. наблюдалось не только в 2006–2008 гг., но и в 2009 г. В (Zhurbas, Kuzmina, 2020) также было получено, что потепление АВ сопровождалось увеличением солености. Результаты (Polyakov et al., 2011) основывались на анализе изменения максимальной температуры АВ. Выводы в (Zhurbas, Kuzmina, 2020) были получены на основе анализа изменчивости максимальной температуры АВ и соответствующей этой температуре солености. Таким образом, расположение центроидов кластера 1 является подтверждением результатов перечисленных работ и позволяет судить о средних значениях температуры и солености АВ в различные годы наблюдения.

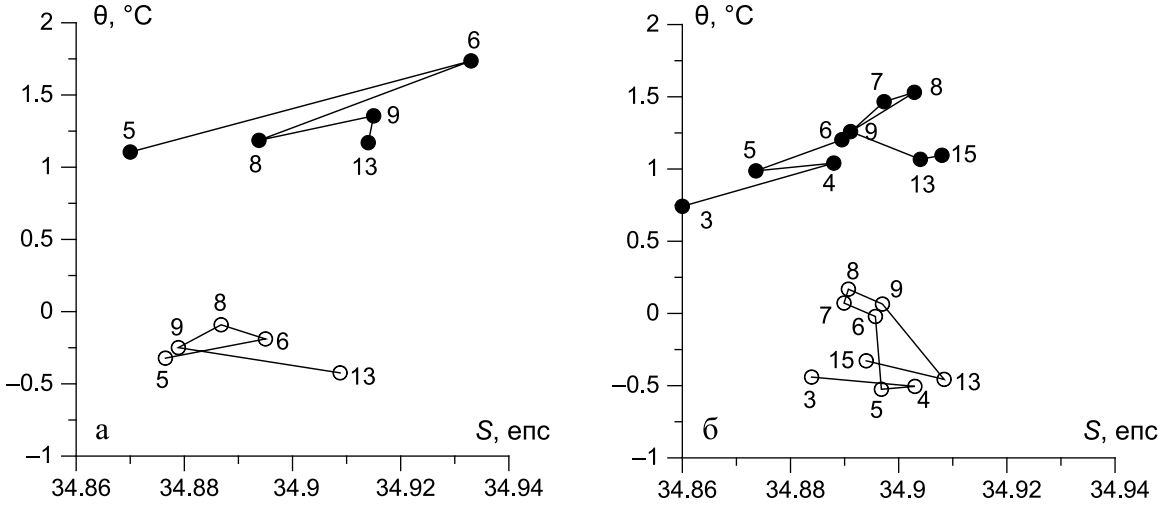

Рис. 3 – Значения температуры и солености центроидов в различные годы наблюдения: вблизи 103° в. д. (**а**), вдоль 126° в. д. (**б**). Числа на графиках обозначают годы наблюдения, например, 5 – 2005 г., 13 – 2013 г. Кластер 1 – черные кружки, кластер 2 – светлые кружки

Сильное различие в средней температуре в 2006 г. на разрезах вблизи 103° в. д. и 126° в. д. связано, возможно, с тем, что область особенно теплых АВ на разрезе 126° в. д. располагалась вдали от склона, то есть находилась вне зоны наблюдения (выходила за северную границу разреза). Так, анализ разрезов вдоль 126° в. д. показал, что в 2006 г. АВ наблюдались только в северной части разреза, протяженность которой составляла всего 100 км, в то время как в 2008 г. наблюдалось ярко выраженное ядро АВ, а горизонтальный масштаб АВ на разрезе составлял 250 км.

Обращает на себя внимание и тот факт, что средняя температура в 2008 г. вдоль 126° в. д. превышает температуру на разрезах вблизи 103° в. д. Более того, различий в температуре на этих двух разрезах в 2005, 2009, 2013 гг. для первого кластера практически нет. Возможно, это связано с особенностями динамики локальных течений и структуры вод в районе вдоль 126° в. д. Не исключено, например, что часть АВ отходит от склона вблизи 126° в. д. вглубь бассейна Нансена и продолжительное время сохраняет запас тепла. Другой возможной причиной превышения температуры АВ вниз по потоку в 2008 г. является расхождение фаз сезонной изменчивости в бассейне Нансена вблизи архипелага Северная Земля и в северо-восточной части моря Лаптевых. Подробное исследование влияния сезонной изменчивости на температуру и соленость АВ в указанных районах можно найти в работах (Dmitrenko et al., 2009; Ruiz-Castillo et al., 2023).

Интересно сравнить значения максимальной температуры АВ и соответствующей этой температуре солености, оцененные в различные годы (рисунок 4), с расположением центроидов на рисунке 3 (рисунок 4 построен по данным таблицы 1 работы (Zhurbas, Kuzmina, 2020)). Такое сравнение позволяет уточнять интерпретацию о потеплении или осолонении АВ в различные годы. Так, в частности, для объяснения потепления в 2013 г., о котором можно судить по изменению максимальной температуры АВ (рисунок 4), разумно высказать два следующих предположения:

1) потепление вызвано изменением климата; 2) потепление обусловлено мезомасштабной изменчивостью, то есть переносом АВ мезомасштабными вихрями вдоль склона Евразийского бассейна вплоть до 126° в. д., которые, согласно, например, работе (Pnyushkov et al., 2018), образуются севернее архипелага Северная Земля и могут иметь максимальную температуру, превышающую среднюю климатическую температуру, типичную для района их образования. Распределение центроидов на рисунке 3 дает определенные основания для исключения первого предположения, так как в 2013 г. не наблюдается увеличения средней температуры АВ.

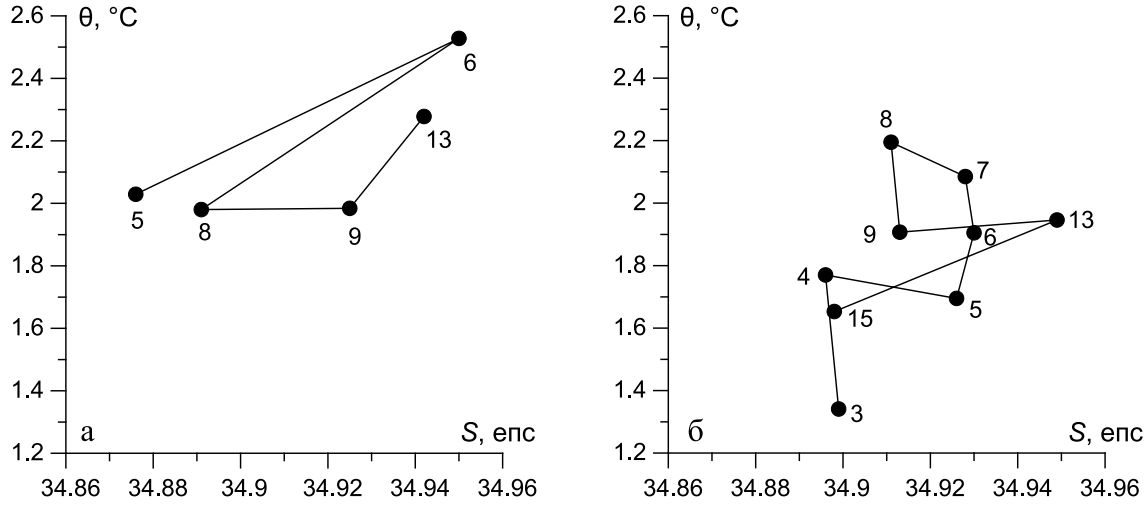

Рис. 4 – Значения максимальной температуры АВ и соответствующей этой температуре солености, полученные в различные годы наблюдения: вблизи 103° в. д. (**а**), вдоль 126° в. д. (**б**).
Графики построены по данным таблицы 1 работы (Zhurbas, Kuzmina, 2020).
Числа на графиках обозначают годы наблюдения

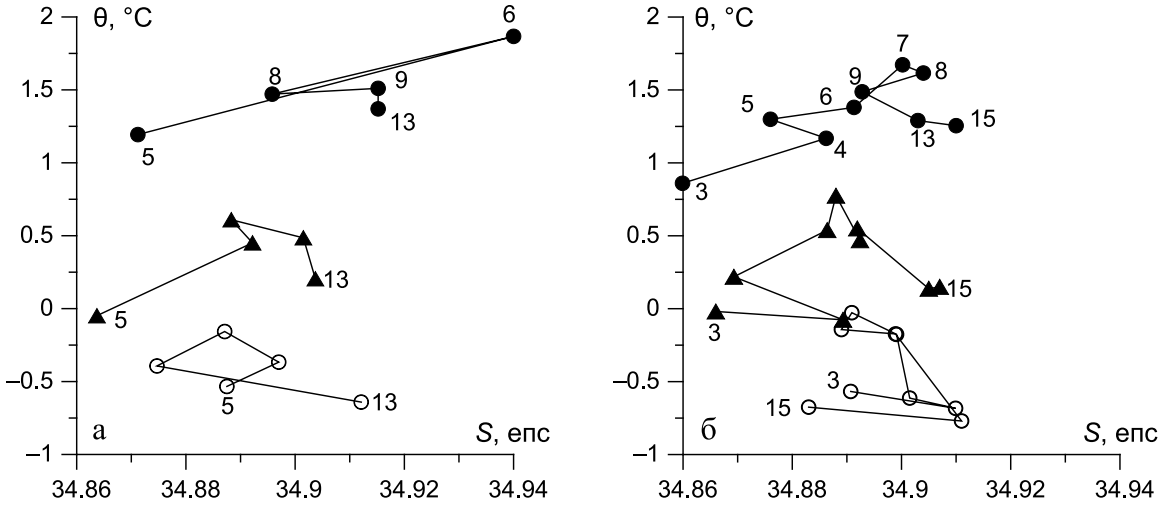

Рис. 5 – То же, что и на рисунке 3, но при разбиении θ, *S*-ансамблей на 3 кластера.
Кластер 1 – черные кружки, кластер 2 – светлые кружки, кластер 3 – треугольники

На рисунке 5 представлены распределения центроидов при разбиении θ, *S*-ансамблей на три кластера. Особое внимание обращает на себя «сигнал» увеличения средней температуры в кластерах 2 и 3, который достаточно высок на разрезах вдоль 126° в. д. Данный «сигнал» может быть обусловлен перемешиванием различных ветвей АВ в периоды потепления, которые связаны с изменением климата, то есть с долгопериодным изменением температуры и солености.

3.2. Результаты обработки θ, *S*, σ-*рядов*

Значения температуры, солености и потенциальной плотности центроидов при разбиении на 2 кластера, оцененные в различные годы, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения температуры, солености, потенциальной плотности центроидов в различные годы наблюдения (2 кластера)

Год измерения	Разрезы вдоль 126° в. д.			Разрезы вблизи 103° в. д.		
	***S*, епс**	**θ ,°C**	**σ, кг/м³**	***S*, епс**	**θ ,°C**	**σ, кг/м³**
2002	34.848	0.461	27.956			
	34.891	–0.573	28.047			
2003	34.861	0.741	27.950			
	34.884	–0.441	28.035			
2004	34.888	1.041	27.951			
	34.903	–0.505	28.053			
2005	34.874	0.986	27.943	34.870	1.106	27.933
	34.897	–0.525	28.049	34.877	–0.322	28.023
2006	34.890	1.202	27.942	34.933	1.736	27.937
	34.896	–0.020	28.023	34.895	–0.189	28.031
2007	34.897	1.465	27.930			
	34.890	0.072	28.013			
2008	34.903	1.530	27.929	34.894	1.187	27.946
	34.891	0.169	28.008	34.887	–0.090	28.019
2009	34.891	1.252	27.940	34.915	1.355	27.951
	34.897	0.060	28.019	34.879	–0.249	28.021
2013	34.904	1.067	27.963	34.914	1.170	27.963
	34.908	–0.455	28.054	34.909	–0.424	28.053
2015	34.908	1.095	27.964			
	34.894	–0.328	28.037			

Сравнение таблиц 1 и 2 показывает, что значения температуры и солености центроидов практически не изменились. Однако подход к анализу трехмерных рядов (θ, *S*, σ-рядов) позволяет определить средние значения одновременно температуры, солености и потенциальной плотности водной массы, выделенной кластером. Это дает возможность оценить изменения средней потенциальной плотности водных масс в различные годы наблюдения. На рисунке 6 представлен результат обработки θ, *S*, σ-рядов (здесь мы ограничимся представлением результатов обработки только для двух кластеров).

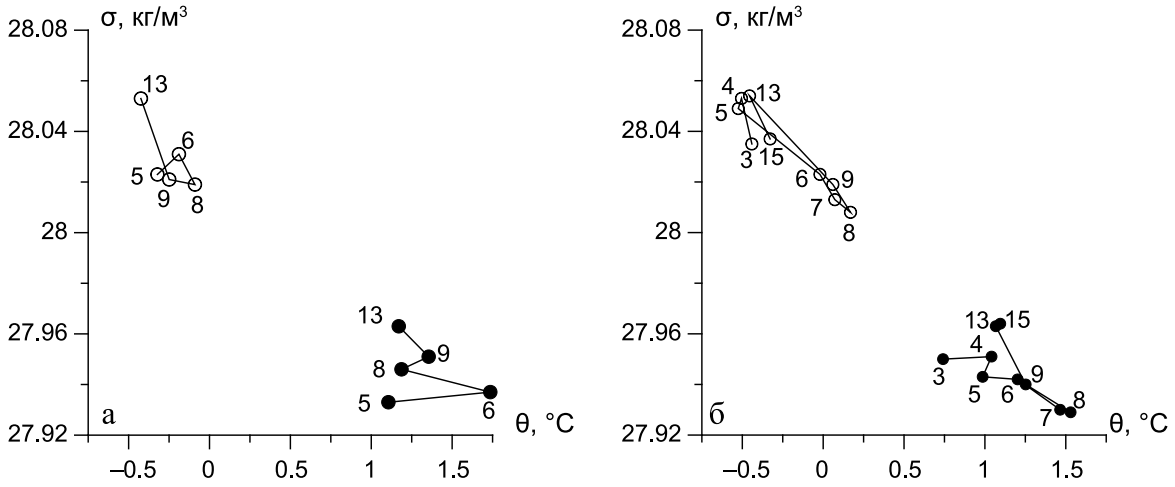

Рис. 6 − Значения температуры и плотности центроидов в различные годы наблюдения: вблизи 103° в. д. (**а**), вдоль 126° в. д. (**б**).
Кластер 1 – черные кружки, кластер 2 – светлые кружки.
Числа на графике обозначают годы наблюдения

Вблизи 103° в. д. в 2006 г. средняя плотность АВ незначительно возросла по сравнению с 2005 г. из-за увеличения средней солености. Иная картина наблюдается в годы потепления (2006–2009 гг.) вдоль 126° в. д.: средняя потенциальная плотность АВ по сравнению с 2005 г. уменьшилась на 0.014 кг/м^3 в первом кластере и на 0.041 кг/м^3 во втором кластере. Такое уменьшение потенциальной плотности в двух кластерах может свидетельствовать о том, что вблизи 126° в. д. центральная часть объема АВ расположена ближе к поверхности океана по сравнению с 2003–2005 гг. и 2013, 2015 гг.

На рисунке 7 представлены изменения температуры, солености и потенциальной плотности центроидов в зависимости от года наблюдения.

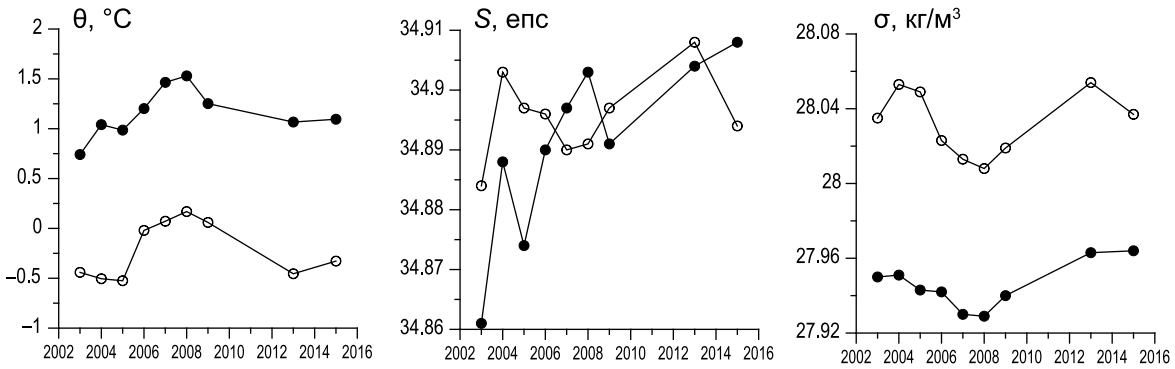

Рис. 7 − Температура, соленость и потенциальная плотность центроидов в различные годы наблюдений вдоль 126° в. д. Кластер 1 – черные кружки, кластер 2 – белые кружки

Представляет интерес сравнение рисунка 7 и рисунка 10 работы (Zhurbas, Kuzmina, 2020), на котором представлены значения максимальной температуры АВ и соответствующие этой температуре значения солености и плотности на разрезах

вдоль 126° в. д. в различные годы наблюдения. Существует удовлетворительное согласие в поведении графиков изменения температуры и потенциальной плотности со временем для центроидов кластеров 1 и 2 на рисунке 7 с соответствующими зависимостями на рисунке 10 работы (Zhurbas, Kuzmina, 2020). График солености на рисунке 7 (кластер 1) показывает более явно выраженный тренд увеличения солености со временем, по сравнению с зависимостью на рисунке 10 работы (Zhurbas, Kuzmina, 2020).

4. Обсуждение метода обработки CTD-данных для кластерного анализа

Обоснованием корректности обработки CTD-данных и метода построения кластеров является, с точки зрения авторов, тот факт, что выделенные в θ, *S*-ансамблях кластеры удовлетворительно соответствуют определениям ФВАВ и БВАВ (см. раздел 3.1). Тем не менее, существуют некоторые уязвимые стороны кластеризации, которые целесообразно обсудить. Здесь мы прежде всего обратим внимание на сложность выбора «координат» жидкого объема и проблему, касающуюся большого отличия в диапазоне изменчивости температуры и солености в анализируемых θ, *S*-ансамблях.

Как показано в разделе 3.2, значения температуры и солености центроидов практически не изменились при анализе двухмерных θ, *S*-рядов и трехмерных θ, *S*, σ-рядов. Однако анализ трехмерных рядов позволил определить средние значения одновременно температуры, солености и потенциальной плотности водной массы, выделенной кластером, что является важным для исследования структуры АВ. Таким образом, применение первого или второго подхода к анализу используемых в нашем случае CTD-данных зависит от цели исследования: если необходимы оценки средних значений только температуры и солености водных масс, целесообразно использовать первый подход, так как оценки центроидов на основе трех «координат» жидкого объема требуют большего количества вычислений. Однако в сложных случаях, когда, например, наблюдается высокая изменчивость θ, *S*-характеристик на больших глубинах (например, значительно превышающих 1000 м), целесообразно включать в «координату» жидкого объема и потенциальную плотность. Поэтому при выборе подхода к кластерному анализу необходимо ориентироваться и на специфику CTD-данных в каждой конкретной ситуации.

Согласно рисунку 2, диапазон изменения температуры и солености после нормировки (см. раздел 3) составляет 3 и 0.25–0.35 соответственно, то есть температура является доминантной характеристикой при определении «метрик длины» для выделения кластеров. Таким образом, если в зоне наблюдения окажутся воды с низкой соленостью ($S < 34.75$ епс) и с низкой температурой ($\theta < 0$ °C), то такие воды при нашей нормировке могут быть отнесены к кластеру БВАВ, хотя такие воды имеют иное происхождение. В случае малости объема таких вод, погрешность в оценивании температуры и солености центроидов будет незначительна. Для того, чтобы проверить погрешность из-за нормировки в случае 2-х кластеров, мы дополнительно рассмотрели

нормировку температуры и солености вида: $\theta_i^* = \theta_i / (1\ °C)$, $S_i^* = S_i / (0.1$ епс). Такая нормировка приводит к практически равным диапазонам изменчивости температуры и солености. Распределение центроидов в зависимости от года наблюдения с учетом такой нормировки θ, *S*-ансамблей, полученных на разрезах вблизи 103° в. д. и вдоль 126° в. д., представлено на рисунке 8. Сравнение данного рисунка и рисунка 3 показывает, что различия незначительны: так, например, вблизи 103° в. д. максимальное отличие в температуре наблюдалось в 2006 г. (кластер 1), и не превышало 0.02 °C, а максимальное отличие в солености наблюдалось в 2005 г. (кластер 1) и составляло всего 0.007 епс. При разделении на три кластера в случаях, когда в зоне разрезов вдоль 126° в. д. присутствовали воды с низкой соленостью и низкой температурой, θ, *S*-характеристики этих вод образовывали новый кластер, отличный от двух кластеров АВ. Поэтому усовершенствование метода кластеризации с целью выделения в θ, *S*-ансамблях различных водных масс, а не только АВ, является важной задачей и для уточнения температуры и солености центроидов, и для оценок перемешивания водных масс. При решении такой задачи встанет вопрос о методике определения наиболее вероятного (или оптимального) количества кластеров. Учитывая, что кластерный метод анализа θ, *S*-ансамблей и θ, *S*, σ-ансамблей, с точки зрения авторов, является новым и перспективным для оценки средних термохалинных характеристик водных масс, усовершенствование данного метода может явиться целью для дальнейших исследований.

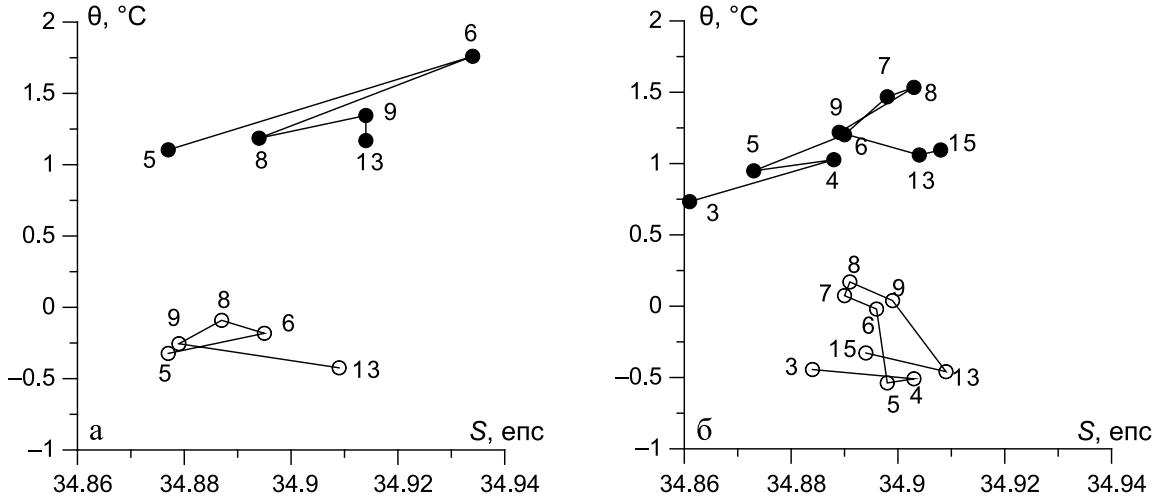

Рис. 8 – То же, что и на рисунке 3, но для другой нормировки солености (см. раздел 4)

5. Выводы

На основе CTD-разрезов, выполненных в рамках программы NABOS, проведен анализ θ, *S*-ансамблей и θ, *S*, σ-ансамблей с помощью кластерного метода с целью описания изменений термохалинной структуры Атлантической воды в различные годы наблюдений.

Для кластерного анализа использовались CTD-данные зондирований вод Евразийского бассейна, полученные на разрезах вдоль 126° в. д. и вблизи 103° в. д. (см. карту на рисунке 1). Для расчетов применялся наиболее популярный метод кластеризации, а именно метод *k*-средних.

Для каждого кластера вычислялись термохалинные характеристики центроидов (центров кластеров), которые соответствовали одновременно средним значениям температуры, солености и потенциальной плотности ФВАВ и БВАВ. Термохалинные характеристики центроидов, оцененные по имеющимся данным, полученным в различные годы наблюдений, представлялись в θ, *S*-координатах и θ, σ-координатах. Дополнительно строились зависимости температуры, солености и потенциальной плотности центроидов от года наблюдения. Анализ θ, *S*-ансамблей, θ, *S*, σ-ансамблей и распределения центроидов в различные годы позволил высказать следующие положения:

1) Выделенные в θ, *S*-ансамблях и θ, *S*, σ-ансамблях кластеры удовлетворительно соответствуют определениям ФВАВ и БВАВ (см. раздел 3.1).

2) Представлены таблицы с термохалинными характеристиками центроидов ФВАВ и БВАВ в разные годы (разделы 3.1 и 3.2).

3) Значения средних термохалинных характеристик АВ свидетельствуют о сильном потеплении и осолонении АВ в 2006 г. (на разрезах вблизи 103° в. д.) и потеплении и осолонении АВ в 2006–2009 гг. (на разрезах вдоль 126° в. д.). Данное положение подтверждает результаты (Polyakov et al., 2011), полученные на основе оценивания изменчивости максимальной температуры АВ, а также дополняет и уточняет выводы (Zhurbas, Kuzmina, 2020), касающиеся потепления и осолонения АВ, которые были сделаны на основе анализа изменения со временем максимальной температуры АВ и соответствующей этой температуре солености (разделы 3.1 и 3.2).

4) Показано, что существует значительный тренд увеличения средней солености ФВАВ от 2003 г. до 2015 г. (раздел 3.2).

5) Получено, что вблизи 103° в. д. в 2006 г. средняя плотность АВ незначительно возросла из-за увеличения средней солености. Иная картина наблюдалась в годы потепления (2006–2009 гг.) вдоль 126° в. д.: средняя потенциальная плотность АВ значительно уменьшилась. Такое уменьшение средней плотности АВ может свидетельствовать о том, что в зоне вблизи 126° в. д. центральная часть объема АВ в годы потепления была расположена ближе к поверхности океана по сравнению с 2003–2005 гг. и 2013, 2015 гг. (раздел 3.2).

6) В годы потепления ФВАВ обнаружено увеличение средней температуры в кластерах, соответствующих БВАВ. Увеличение температуры особенно значительно в 2006–2009 гг. на разрезах вдоль 126° в. д. Данное увеличение средней температуры может быть обусловлено интенсивным перемешиванием различных ветвей АВ в периоды потепления, которые связаны с изменением климата (разделы 3.1 и 3.2).

В конце работы рассмотрены подходы к выбору наиболее оптимального метода кластерного анализа и представлены результаты оценивания влияния диапазонов изменчивости температуры и солености в анализируемых CTD-данных на точность определения центроидов.

Благодарности. Работа поддерживалась бюджетным финансированием Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (тема FMWE-2021-0001). Авторы признательны рецензентам за полезные замечания.

Список литературы

1. *Журбас Н. В.* О спектрах собственных значений в модельной задаче описания образования крупномасштабных интрузий в Арктическом бассейне (на англ. яз.) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. № 1. С. 40–45. https://doi.org/10.7868/S2073667318010045.
2. *Журбас Н. В.* Оценка расхода и термохалинных характеристик атлантических вод в Евразийском бассейне // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 38–51. https://doi.org/10.3103/S1068373919090048.
3. *Иванов В. В., Аксенов Е. О.* Трансформация Атлантической воды в восточной части котловины Нансена по данным наблюдений и моделирования // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 1 (95). С. 72–87.
4. *Кузьмина Н. П.* Об одной гипотезе образования крупномасштабных интрузий в Арктическом бассейне // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 2. С. 15–26.
5. *Aagaard K.* On the deep circulation of the Arctic Ocean // Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers. 1981. Vol. 28. Iss. 3. P. 251–268. https://doi.org/10.1016/0198-0149(81)90066-2.
6. *Beszczynska-Möller A., Fahrbach E., Schauer U., Hansen E.* Variability in Atlantic water temperature and transport at the entrance to the Arctic Ocean, 1997–2010 // ICES Journal of Marine Science. 2012. Vol. 69. Iss. 5. P. 852–863. https://doi.org/10.1093/icesjms/fss056.
7. *Dmitrenko I., Kirillov S., Ivanov V., Woodgate R., Polyakov I., Koldunov N., Fortier L., Lalande C., Kaleschke L., Bauch D., Hölemann J., Timokhov L.* Seasonal modification of the Arctic Ocean intermediate water layer off the eastern Laptev Sea continental shelf break // Journal of Geophysical Research. 2009. Vol. 114. Iss. C06010. https://doi.org/10.1029/2008JC005229.
8. *Dmitrenko I. A., Rudels B., Kirillov S. A., Aksenov Y. O., Lien V. S., Ivanov V. V., Schauer U., Polyakov I. V., Coward A., Barber D. J.* Atlantic Water flow into the Arctic Ocean through the St. Anna Trough in the northern Kara Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2015. Vol. 120. Iss. 7. P. 5158–5178. https://doi.org/10.1002/2015JC010804.
9. *Kuzmina N., Rudels B., Zhurbas V., Stipa T.* On the structure and dynamical features of intrusive layering in the Eurasian Basin in the Arctic Ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2011. Vol. 116. C00D11. https://doi.org/10.1029/2010JC006920.
10. *Pfirman S. L., Bauch D., Gammelsrød T.* The northern Barents Sea: water mass distribution and modification // The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment, Geophysical Monograph 85. Hoboken, NJ: American Geophysical Union, 1994. P. 77–94.
11. *Pnyushkov A. V., Polyakov I. V., Ivanov V. V., Aksenov Ye., Coward A. C., Janout M., Rabe B.* Structure and variability of the boundary current in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 101. P. 80–97. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.03.001.
12. *Pnyushkov A., Polyakov I., Padman L., Nguyen An T.* Structure and dynamics of mesoscale eddies over the Laptev Sea. Ocean Science. 2018. Vol. 14. Iss. 5. P. 1329–1347. https://doi.org/10.5194/os-14-1329-2018.

13. *Polyakov I. V., Beszczynska A., Carmack E. C., Dmitrenko I. A., Fahrbach E., Frolov I. E., Gerdes R., Hansen E., Holfort J., Ivanov V. V., Johnson M. A., Karcher M., Kauker F., Morison J., Orvik K. A., Schauer U., Simmons H. L., Skagseth Ø., Sokolov V. T., Steele M., Timokhov L. A., Walsh D., Walsh J. E.* One more step toward a warmer Arctic // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32. L17605. https://doi.org/10.1029/2005GL023740.
14. *Polyakov I. V., Alexeev V. A., Ashik I. M., Bacon S., Beszczynska-Möller A., Carmack E. C., Dmitrenko I. A., Fortier L., Gascard J.-C., Hansen E., Hölemann J., Ivanov V. V., Kikuchi T., Kirillov S., Lenn Y.-D., McLaughlin F. A., Piechura J., Repina I., Timokhov L. A., Walczowski W., Woodgate R.* Fate of Early 2000s Arctic Warm Water Pulse // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011. Vol. 92. Iss. 5. P. 561–566. https://doi.org/10.1175/2010BAMS2921.1.
15. *Rudels B., Jones E. P., Anderson L. G., Kattner G.* On the intermediate depth waters of the Arctic Ocean // The Role of the Polar Oceans in Shaping the Global Climate. Washington, DC: American Geophysical Union, 1994. P. 33–46.
16. *Rudels B., Björk G., Muench R. D., Schauer U.* Double-diffusive layering in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Journal of Marine Systems. 1999. Vol. 21. Iss. 1–4. P. 3–27. https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00003-2.
17. *Rudels B., Jones E. P., Schauer U., Eriksson P.* Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline water // Polar research. 2004. Vol. 23. No. 2. P. 181–208. https://doi.org/10.3402/polar.v23i2.6278.
18. *Rudels B., Korhonen M., Schauer U., Pisarev S., Rabe B., Wisotzki A.* Circulation and transformation of Atlantic water in the Eurasian Basin and the contribution of the Fram Strait inflow branch to the Arctic Ocean heat budget // Progress in Oceanography. 2015. Vol. 132. P. 128–152. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.003.
19. *Rudels B.* Arctic Ocean circulation, processes and water masses: A description of observations and ideas with focus on the period prior to the International Polar Year 2007–2009 // Progress in Oceanography. 2015. Vol. 132. P. 22–67. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.11.006.
20. *Ruiz-Castillo E., Janout M., Hölemann J., Kanzow T., Schulz K., Ivanov V. V.* Structure and seasonal variability of the Arctic Boundary Current north of Severnaya Zemlya // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2023. Vol. 128. Iss. 1. e2022JC018677. https://doi.org/10.1029/2022JC018677.
21. *Schauer U., Muench R. D., Rudels B., Timokhov L.* Impact of eastern Arctic shelf waters on the Nansen Basin intermediate layers // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1997. Vol. 102. Iss. C2. P. 3371–3382. https://doi.org/10.1029/96JC03366.
22. *Schauer U., Loeng H., Rudels B., Ozhigin V. K., Dieck W.* Atlantic Water flow through the Barents and Kara Seas // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2002a. Vol. 49. Iss. 12. P. 2281–2298. https://doi.org/10.1016/S0967-0637(02)00125-5.
23. *Schauer U., Rudels B., Jones E. P., Anderson L. G., Muench R. D., Björk G., Swift J. H., Ivanov V., Larsson A.-M.* Confluence and redistribution of Atlantic water in the Nansen, Amundsen and Makarov basins // Annales Geophysicae. 2002b. Vol. 20. Iss. 2. P. 257–273. https://doi.org/10.5194/angeo-20-257-2002.
24. *Walsh D., Polyakov I., Timokhov L., Carmack E.* Thermohaline structure and variability in the eastern Nansen Basin as seen from historical data // Journal of Marine Research. 2007. Vol. 65. No. 5. P. 685–714. https://doi.org/10.1357/002224007783649466.
25. *Zhurbas N., Kuzmina N.* Variability of the thermohaline structure and transport of Atlantic water in the Arctic Ocean based on NABOS (Nansen and Amundsen Basin Observing System) hydrography data // Ocean Science. 2020. Vol. 16. P. 405–421. https://doi.org/10.5194/os-16-405-2020.

ISSN (online): 2587-9634 / ISSN (print): 1564-2291
Океанологические исследования. 2023. Том 51. № 1. С. 36–53

Статья поступила в редакцию 14.02.2023, одобрена к печати 20.03.2023.
Для цитирования: *Лыжков Д. А., Журбас Н. В., Кузьмина Н. П.* Анализ *T*, *S*-ансамблей Атлантической водной массы Евразийского бассейна Арктики с помощью кластерного метода // Океанологические исследования. 2023. № 51 (1). С. 36–53. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).2.

ANALYSIS OF *T*, *S*-CHARACTERISTICS OF THE ATLANTIC WATER MASS IN THE EURASIAN BASIN USING THE CLUSTER METHOD

D. A. Lyzhkov, N. V. Zhurbas, N. P. Kuzmina

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: kuzmina@ocean.ru, dlyzhkov@gmail.com

Cluster analysis was performed using CTD data from transects across continental slope of the Eurasian Basin collected within the NABOS (Nansen and Amundsen Basins Observing System) project in 2002–2015. The most commonly used *k*-means clustering method was applied for calculations. Two cases were considered: division into two and three clusters. The identified clusters which united points on the θ, *S*-diagrams (θ, *S* are potential temperature and salinity, respectively) satisfactorily corresponded to the θ, *S*-values of the Fram and Barents branches of the Atlantic water. For each cluster the thermohaline characteristics of centroids (cluster centers) were calculated, that is, the average values at the same time of temperature, salinity and potential density of each water mass. The thermohaline characteristics of centroids, estimated from the available data obtained in different years of observation, were presented in θ, *S*-coordinates and θ, σ-coordinates (σ is potential density). Additionally, dependences of temperature, salinity, and potential density of centroids on the year of observation were analyzed. The final results made it possible to obtain estimates of the average thermohaline characteristics of Atlantic water in different years of observation and the variability of these estimates from year to year. In particular, it was found that the values of the average thermohaline characteristics of the AW indicated a strong warming and salinization of the AW in 2006–2009 (sections along 126° E), and the response to warming was observed in all AW clusters. An interpretation of the obtained results was given. Approaches to the choice of the most optimal method of cluster analysis were considered. The results of estimating the influence of temperature and salinity variability ranges in the analyzed CTD data on the accuracy of centroids evaluations were presented.

Keywords: branches of the Atlantic water, *T*, *S*-characteristics, clusters, estimates of the average thermohaline characteristics of water masses

Acknowledgments: The work was supported by the budget funding of the Shirshov Institute of Oceanology of RAS (subject FMWE-2021-0001). The authors are grateful to the reviewers for useful comments.

References

1. Aagaard, K., 1981: On the deep circulation of the Arctic Ocean. *Deep Sea Research.* Part A: *Oceanographic Research Papers*, **28** (3), 251–268, https://doi.org/10.1016/0198-0149(81)90066-2.
2. Beszczynska-Möller, A., E. Fahrbach, U. Schauer, and E. Hansen, 2012: Variability in Atlantic water temperature and transport at the entrance to the Arctic Ocean, 1997–2010. *ICES Journal of Marine Science*, **69** (5), 852–863, https://doi.org/10.1093/icesjms/fss056.
3. Dmitrenko, I., S. Kirillov, V. Ivanov, R. Woodgate, I. Polyakov, N. Koldunov, L. Fortier, C. Lalande, L. Kaleschk., D. Bauch, J. Hölemann, and L. Timokhov, 2009*:* Seasonal modification of the Arctic Ocean intermediate water layer off the eastern Laptev Sea continental shelf break. *Journal of Geophysical Research*, **114** (C06010), https://doi.org/10.1029/2008JC005229.
4. Dmitrenko, I. A., B. Rudels, S. A. Kirillov, Y. O. Aksenov, V. S. Lien, V. V. Ivanov, U. Schauer, I. V. Polyakov, A. Coward, and D. J. Barber, 2015: Atlantic Water flow into the Arctic Ocean through the St. Anna Trough in the northern Kara Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **120** (7), 5158–5178, https://doi.org/10.1002/2015JC010804.
5. Ivanov, V. V. and Ye. O. Aksenov, 2013: Transformatsiya Atlanticheskoy vody v vostochnoy chasti kotloviny Nansena po dannym nablyudeniy i modelirovaniya (Transformation of the Atlantic Water in the Eastern Nansen Basin Based on Observational and Modeling Data). *Arctic and Antarctic research*, **1** (95), 72–87.
6. Kuzmina, N. P., 2016: Ob odnoy gipoteze obrazovaniya krupnomasshtabnykh intruziy v Arkticheskom basseyne (About One Hypothesis of Generation of Large-Scale Intrusions in the Arctic Ocean). *Fundamental and Applied Hydrophysics*, **9** (2), 15–26.
7. Kuzmina, N., B. Rudels, V. Zhurbas, and T. Stipa, 2011: On the structure and dynamical features of intrusive layering in the Eurasian Basin in the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **116** (C00D11), https://doi.org/10.1029/2010JC006920.
8. Pfirman, S. L., D. Bauch, and T. Gammelsrød, 1994: The northern Barents Sea: water mass distribution and modification. *The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment, Geophysical Monograph 85*, Hoboken, NJ, American Geophysical Union, 77–94.
9. Pnyushkov, A. V., I. V. Polyakov, V. V. Ivanov, Ye. Aksenov, A. C. Coward, M. Janout, and B. Rabe, 2015: Structure and variability of the boundary current in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *Deep Sea Research.* Part I: *Oceanographic Research Papers*, **101**, 80–97, https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.03.001.
10. Pnyushkov, A., I. Polyakov, L. Padman, and An T. Nguyen, 2018: Structure and dynamics of mesoscale eddies over the Laptev Sea. *Ocean Science*, **14** (5), 1329–1347, https://doi.org/10.5194/os-14-1329-2018.
11. Polyakov, I. V., A. Beszczynska, E. C. Carmack, I. A. Dmitrenko, E. Fahrbach, I. E. Frolov, R. Gerdes, E. Hansen, J. Holfort, V. V. Ivanov, M. A. Johnson, M. Karcher, F. Kauker, J. Morison, K. A. Orvik, U. Schauer, H. L. Simmons, Ø. Skagseth, V. T. Sokolov, M. Steele, L. A. Timokhov, D. Walsh, and J. E. Walsh, 2005: One more step toward a warmer Arctic. *Geophysical Research Letters*, **32** (L17605), https://doi.org/10.1029/2005GL023740.
12. Polyakov, I. V., V. A. Alexeev, I. M. Ashik, S. Bacon, A. Beszczynska-Möller, E. C. Carmack, I. A. Dmitrenko, L. Fortier, J.-C. Gascard, E. Hansen, J. Hölemann, V. V. Ivanov, T. Kikuchi, S. Kirillov, Y.-D. Lenn, F. A. McLaughlin, J. Piechura, I. Repina, L. A. Timokhov, W. Walczowski, and R. Woodgate, 2011: Fate of Early 2000s Arctic Warm Water Pulse. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **92** (5), 561–566, https://doi.org/10.1175/2010BAMS2921.1.
13. Rudels, B., E. P. Jones, L. G. Anderson, and G. Kattner, 1994: On the intermediate depth waters of the Arctic Ocean. *The Role of the Polar Oceans in Shaping the Global Climate*, Washington, DC: American Geophysical Union, 33–46.

14. Rudels, B., G. Björk, R. D. Muench, and U. Schauer, 1999: Double-diffusive layering in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *Journal of Marine Systems*, **21** (1–4), 3–27, https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00003-2.
15. Rudels, B., E. P. Jones, U. Schauer, and P. Eriksson, 2004: Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline water. *Polar research*, **23** (2), 181–208, https://doi.org/10.3402/polar.v23i2.6278.
16. Rudels, B., M. Korhonen, U. Schauer, S. Pisarev, B. Rabe, and A. Wisotzki, 2015: Circulation and transformation of Atlantic water in the Eurasian Basin and the contribution of the Fram Strait inflow branch to the Arctic Ocean heat budget. *Progress in Oceanography*, **132**, 128–152, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.003.
17. Rudels, B., 2015: Arctic Ocean circulation, processes and water masses: A description of observations and ideas with focus on the period prior to the International Polar Year 2007–2009. *Progress in Oceanography*, **132**, 22–67, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.11.006.
18. Ruiz-Castillo, E., M. Janout, J. Hölemann, T. Kanzow, K. Schulz, and V. V. Ivanov, 2023: Structure and seasonal variability of the Arctic Boundary Current north of Severnaya Zemlya. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **128** (1), e2022JC018677, https://doi.org/10.1029/2022JC018677.
19. Schauer, U., R. D. Muench, B. Rudels, and L. Timokhov, 1997: Impact of eastern Arctic shelf waters on the Nansen Basin intermediate layers. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **102** (C2), 3371–3382, https://doi.org/10.1029/96JC03366.
20. Schauer, U., H. Loeng, B. Rudels., V. K. Ozhigin, and W. Dieck, 2002: Atlantic Water flow through the Barents and Kara Seas. *Deep Sea Research.* Part I: *Oceanographic Research Papers*, **49** (12), 2281–2298, https://doi.org/10.1016/S0967-0637(02)00125-5.
21. Schauer, U., B. Rudels, E. P. Jones, L. G. Anderson, R. D. Muench, G. Björk, J. H. Swift, V. Ivanov, and A.-M. Larsson, 2002: Confluence and redistribution of Atlantic water in the Nansen, Amundsen and Makarov basins. *Annales Geophysicae*, **20** (2), 257–273, https://doi.org/10.5194/angeo-20-257-2002.
22. Walsh, D., I. Polyakov, L. Timokhov, and E. Carmack, 2007: Thermohaline structure and variability in the eastern Nansen Basin as seen from historical data. *Journal of Marine Research*, **65** (5), 685–714, https://doi.org/10.1357/002224007783649466.
23. Zhurbas, N. V., 2018: O spektrakh sobstvennykh znacheniy v model'noy zadache opisaniya obrazovaniya krupnomasshtabnykh intruziy v Arkticheskom basseyne (On the eigenvalue spectra for a model problem describing formation of the large-scale intrusions in the Arctic basin). *Fundamental and Applied Hydrophysics*, **11** (1), 40–45, https://doi.org/10.7868/S2073667318010045.
24. Zhurbas, N. V., 2019: Otsenka raskhoda i termokhalinnykh kharakteristik atlanticheskikh vod v Yevraziyskom basseyne (Estimation of Flow Rate and Thermohaline Characteristics of Atlantic Water in the Eurasian Basin). *Russian Meteorology and Hydrology*, **44** (9), 603–612, https://doi.org/10.3103/S1068373919090048.
25. Zhurbas, N. and N. Kuzmina, 2020: Variability of the thermohaline structure and transport of Atlantic water in the Arctic Ocean based on NABOS (Nansen and Amundsen Basin Observing System) hydrography data. *Ocean Science*, **16**, 405–421, https://doi.org/10.5194/os-16-405-2020.

Submitted 14.02.2023, accepted 20.03.2023.
For citation: Lyzhkov, D. A., N. V. Zhurbas, and N. P. Kuzmina, 2023: Analysis of *T*, *S*-characteristics of the Atlantic water mass in the Eurasian Basin using the cluster method. *Journal of Oceanological Research*, **51** (1), 36–53, https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).2.