

ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 551.322

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-2-125-140

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОД ФЬОРДОВ ЗАПАДНОГО ШПИЦБЕРГЕНА

Е.В. БЛОШКИНА, К.В. ФИЛЬЧУК*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*kirill@aari.ru

THE PRESENT STATE OF WEST SVALBARD FJORDS WATER MASSES

E.V. BLOSHKINA, K.V. FILCHUK*

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*kirill@aari.ru

Received January, 15, 2018

Accepted June, 13, 2018

Keywords: Atlantic water, freshwater content, heat content, water masses, West Svalbard.

Summary

The study is based on CTD measurements collected during Arctic cruises in Isfjorden including Billefjorden and Grönfjorden in summer between 2011 and 2017. The purpose of this paper is to describe the present state of fjords water masses. In the first part of the paper distributions of water masses in Isfjorden and Billefjorden in summer 2014–2017 and in Grönfjorden in summer 2011–2017 are analyzed. In paper was shown that for Isfjorden and Grönfjorden there were 4 types of masses: surface water, intermediate water, transformed Atlantic water, and Atlantic water. In June 2014, was recorded the situation when Atlantic waters occupied the entire water area of Isfjord and Grönfjord. In summer in Billefjorden were identified 4 types of masses: surface water, intermediate water, local water, and winter water. In Isfjorden, new maximum temperature of Atlantic water was observed (6.85 °C) in summer 2016. It is greater on almost 0.5 °C than previous warmest peak in 2006. The maximum average values of water temperature, heat content in the upper 40 m layer were recorded in 2016. The summer 2016 was the warmest in Isfjorden, Billefjorden and Grönfjorden during the survey period.

Поступила 15 января 2018 г.

Принята к печати 13 июня 2018 г.

Ключевые слова: атлантические воды, водные массы, Западный Шпицберген, содержание пресных вод, теплосодержание.

Citation: Bloshkina E.V., Filchuk K.V. The present water masses conditions of West Spitsbergen fjords. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (2): 125–140. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-2-125-140.

В данной статье анализируются результаты океанографических съемок, выполненных в Ис-фьорде, включая заливы Билле-фьорд и Грён-фьорд, в летние месяцы с 2011 по 2017 г. Основная цель статьи — описание современного состояния вод Ис-фьорда и его заливов. В первой части статьи анализируются особенности распределения водных масс в Ис-фьорде и Билле-фьорде в летние месяцы с 2014 по 2017 г. и в Грён-фьорде в летние месяцы с 2011 по 2017 г. Анализ измерений показал, что для Ис-фьорда и Грён-фьорда было характерно наличие четырех водных масс: поверхностной, промежуточной, трансформированной атлантической и атлантической. В июне 2014 г. была зафиксирована ситуация, когда вся акватория Ис-фьорда и Грён-фьорда была занята атлантическими водами. Для Билле-фьорда было характерно также наличие четырех водных масс: поверхностной, промежуточной, локальной и зимней. В 2016 г. был зафиксирован новый исторический максимум температуры в слое атлантических вод в Ис-фьорде (6,8 °C), что почти на 0,5 °C выше предыдущего рекорда, наблюдавшегося в 2006 г. Также по результатам расчетов для 2016 г. были получены максимальные средние значения температуры воды, теплосодержания в верхнем 40-метровом слое в Ис-фьорде, Билле-фьорде и Грён-фьорде, в целом 2016 г. стал самым теплым для этих заливов за исследуемый период.

ВВЕДЕНИЕ

Фьорды Западного Шпицбергена расположены в зоне активного взаимодействия атлантических вод, несущих свое тепло из умеренных широт в полярные регионы, и арктических вод, поступающих сюда из Баренцева моря.

Атлантические воды (АВ) распространяются вдоль архипелага в виде Западно-Шпицбергенского течения, являющегося продолжением Норвежского течения. По результатам недавних исследований установлено, что именно воды Западно-Шпицбергенского течения переносят большую часть всего объема АВ, поступающих в Арктический бассейн [1], и являются основным переносчиком тепла в Центральную Арктику [2, 3].

Арктические воды, характеризующиеся меньшими значениями солёности и температуры по сравнению с АВ, поступают в район континентального шельфа Западного Шпицбергена с водами Восточно-Шпицбергенского течения [4, 5], создающего своеобразный барьер для фьордов Западного Шпицбергена от прямого постоянного влияния АВ. Между АВ и арктическими водами формируется фронтальная зона, известная как арктический фронт [6].

Материковые ледники, подверженные процессам абляции, являются основным источником пресных вод, поступающих во фьорды [7]. Увеличение объема их поступления в летний период приводит к более устойчивой вертикальной стратификации [8].

Процессы ледотаяния морского льда обычно начинаются во фьордах в мае–июне и также приводят к распреснению поверхностного слоя. Процессы ледообразования, в результате которых формируется переохлажденная водная масса с высокими значениями солёности, начинаются обычно в ноябре. Однако доля влияния процессов ледотаяния и ледообразования на гидрологический режим фьордов постепенно снижается в связи с тем, что в последние годы на архипелаге Шпицберген наблюдаются аномально теплые зимы, ледяной покров образуется не каждый год и не во всех фьордах [9]. Помимо этого происходит увеличение температуры АВ, поступающих к берегам архипелага, затоки АВ внутрь фьордов становятся все более регулярными, их объем увеличивается [8, 10, 11]. Эти изменения оказывают глубокое влияние на структуру и функционирование всей экосистемы фьордов [12, 13].

В данной статье анализируются результаты океанографических съемок, выполненных в Ис-фьорде, включая заливы Билле-фьорд и Грён-фьорд, в летние месяцы

с 2011 по 2017 г. в экспедициях Арктического и антарктического научно исследовательского института (ААНИИ) на базе Российского научного центра на архипелаге Шпицберген (РНЦШ).

С целью описания современного состояния вод Ис-фьорда и его заливов рассматриваются особенности распределения водных масс за исследуемый период, различные характеристики вод фьордов, такие как средняя температура и соленость, содержание пресных вод, теплосодержание и т.д. Также проводится сравнение этих характеристик с характеристиками, полученными для других фьордов Западного Шпицбергена за последние несколько лет в [14].

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Ис-фьорд, Грён-фьорд и Билле-фьорд расположены на западном берегу о. Западный Шпицберген (рис. 1), который является крупнейшим островом архипелага.

Ис-фьорд, имеющий протяженность вдоль оси 107 км и ориентированный с юго-запада на северо-восток, является самым большим заливом архипелага Шпицберген. Сильно изрезанная береговая линия Ис-фьорда образует несколько заливов меньшего размера: Грён-фьорд и Адвент-фьорд на южной стороне; Сассен-фьорд, переходящий в Темпел-фьорд, и Билле-фьорд, заканчивающийся бухтами Мимер, Петунья, Адольфа на северо-востоке; Норд-фьорд, переходящий в Экман-фьорд и Диксон-фьорд на севере. Отсутствие топографического барьера на входе фьорда

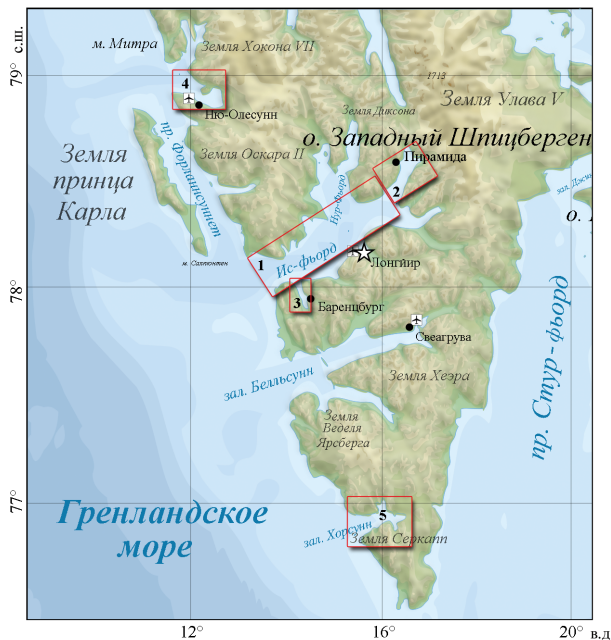


Рис. 1. Район исследования: 1 — Ис-фьорд, 2 — Билле-фьорд, 3 — Грён-фьорд, 4 — Конгс-фьорд, 5 — фьорд Хорнсунн

Fig. 1. Study area: 1 — Isfjorden, 2 — Billefjorden, 3 — Grönfjorden, 4 — Kongsfjorden, 5 — Hornsund

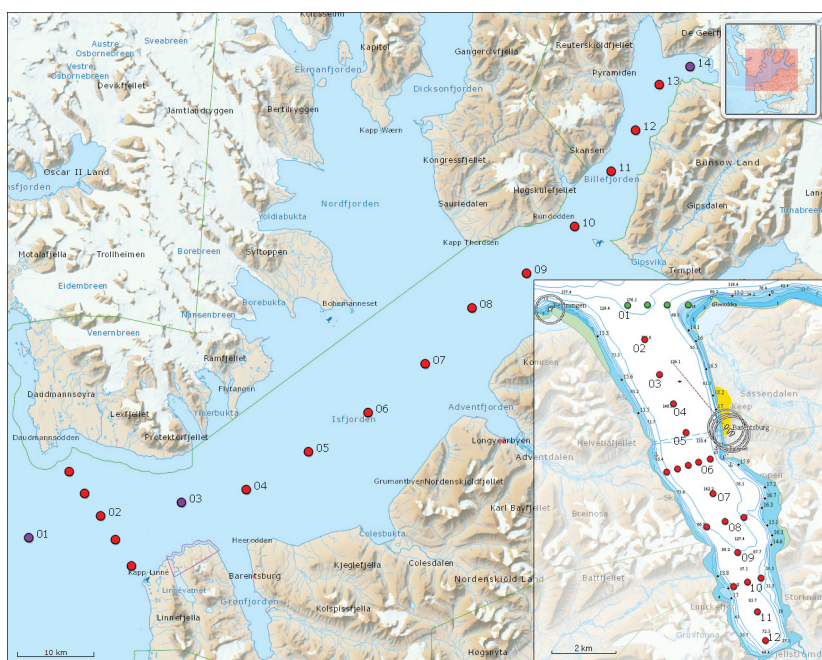


Рис. 2. Гидрологические станции в Ис-фьорде, Билле-фьорде и Грэн-фьорде (врезка). Красные точки — станции, по которым были выполнены расчеты, зеленые точки — станции, выполненные в июне 2014 г. Картооснова: TopoSvalbard © Norwegian Polar Institute <http://toposvalbard.npolar.no>

Fig. 2. CTD stations in Isfjorden, Billefjorden and Grönfjorden (include at the map). Red points — stations that were included in calculations, green points — stations in June 2014. Map: TopoSvalbard © Norwegian Polar Institute <http://toposvalbard.npolar.no>

позволяет водным массам с континентального шельфа беспрепятственно проникать в глубь акватории.

Расположенный в восточной части Ис-фьорда Билле-фьорд — единственный из рассматриваемых фьордов в системе Ис-фьорда имеет на входе два топографических барьера — внешний (70 м) и внутренний (40 м), препятствующие свободному водообмену с соседними акваториями. Его протяженность составляет около 30 км в длину и 5–8 км в ширину, средняя глубина равна 160 м. Билле-фьорд имеет площадь 182 км² (5,9 % от Ис-фьорда) и объем 13 км³ (3,5 % от Ис-фьорда) [15].

Океанографические станции, выполненные в акватории Ис-фьорда и Билле-фьорда, представлены на рис. 2.

Грэн-фьорд — сравнительно небольшой фьорд, расположенный на южной стороне Ис-фьорда в непосредственной близости от его горловины. Залив ориентирован в меридиональном направлении, его протяженность составляет примерно 16,5 км. Ширина и глубина фьорда увеличиваются с юга (кутовая часть) на север (выход в Ис-фьорд) с 1,8 до 5,4 км и с 50 до 170 м соответственно. Порог в горловине Грэн-фьорда отсутствует, что обеспечивает возможность свободного обмена с водными массами Ис-фьорда. Схема размещения станций океанологического полигона РНЦШ на акватории залива Грэн-фьорд представлена на рис. 2.

С 2014 по 2017 г. были выполнены три летние съемки в Ис-фьорде, включая Билле-фьорд, и одна съемка только в горле Ис-фьорда, с 2011 по 2017 г. было выполнено 7 летних съемок в Грён-фьорде.

ВОДНЫЕ МАССЫ ИС-ФЬОРДА И ЕГО ЗАЛИВОВ

Для выделения водных масс в исследуемых фьордах использована классификация Сведсена [16], разработанная им для системы фьордов Конгс-фьорд — Кросс-фьорд, так же относящихся к фьордам Западного Шпицбергена (табл. 1). В дальнейшем предложенная Сведсеном классификация была использована для анализа водных масс в Ис-фьорде в работе [15].

Таблица 1

Классификация водных масс фьордов Западного Шпицбергена

Водная масса	Характеристики
Атлантическая (АВ)	Температура $> 3^{\circ}\text{C}$, соленость $> 34,9\text{‰}$
Арктическая (АрВ)	$-0,5 < \text{температура} < 1,0^{\circ}\text{C}$, $34,3 < \text{соленость} < 34,8\text{‰}$
Трансформированная атлантическая (ТАВ)	$1,0 < \text{температура} < 3,0^{\circ}\text{C}$, соленость $> 34,7\text{‰}$
Поверхностная (ПВ)	Температура $> 1^{\circ}\text{C}$, соленость $< 34\text{‰}$
Промежуточная (ПрВ)	Температура $> 1^{\circ}\text{C}$, $34 < \text{соленость} < 34,9\text{‰}$
Локальная (ЛВ)	$-0,5 < \text{температура} < 1,0^{\circ}\text{C}$, соленость $\sim 34\text{‰}$
Зимняя (ЗВ)	Температура $< -0,5^{\circ}\text{C}$, соленость $> 34,3\text{‰}$

Под АВ понимаются воды Западно-Шпицбергенского течения. АрВ проникает во фьорды с континентального шельфа архипелага. ТАВ образуется в результате смешения АВ и АрВ. Формирование ПВ происходит во фьордах поздней весной и летом под влиянием увеличения объема материкового стока, таяния морского льда и радиационного прогрева. ПрВ — результат смешения ПВ и АВ (ТАВ). ЛВ формируется в осенне-зимний период в процессе охлаждения ПВ или ПрВ. Образование ЗВ происходит в результате выхолаживания воды до температуры замерзания при данной солёности и выделения рассола при формировании льда.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДНЫХ МАСС В АКВАТОРИИ ИС-ФЬОРДА В ЛЕТНИЕ МЕСЯЦЫ 2014–2017 гг.

В июне 2014 г. вся акватория Ис-фьорда была занята водной массой, характеризующейся значениями температуры от $0,5$ до $4,5^{\circ}\text{C}$ и практически одинаковыми во всем фьорде значениями солёности ($\sim 35,1\text{‰}$) (рис. 3а, б, станции 1–11). Такие высокие значения солёности указывают на то, что зафиксированная водная масса — АВ. Чем же тогда объяснить необычно низкие для АВ значения температуры в промежуточном и придонном слоях? Выраженная вертикальная стратификация по температуре позволяет предположить, что АВ находилась в Ис-фьорде достаточно длительное время, чтобы ее верхние слои начали охлаждаться в результате взаимодействия с атмосферой,

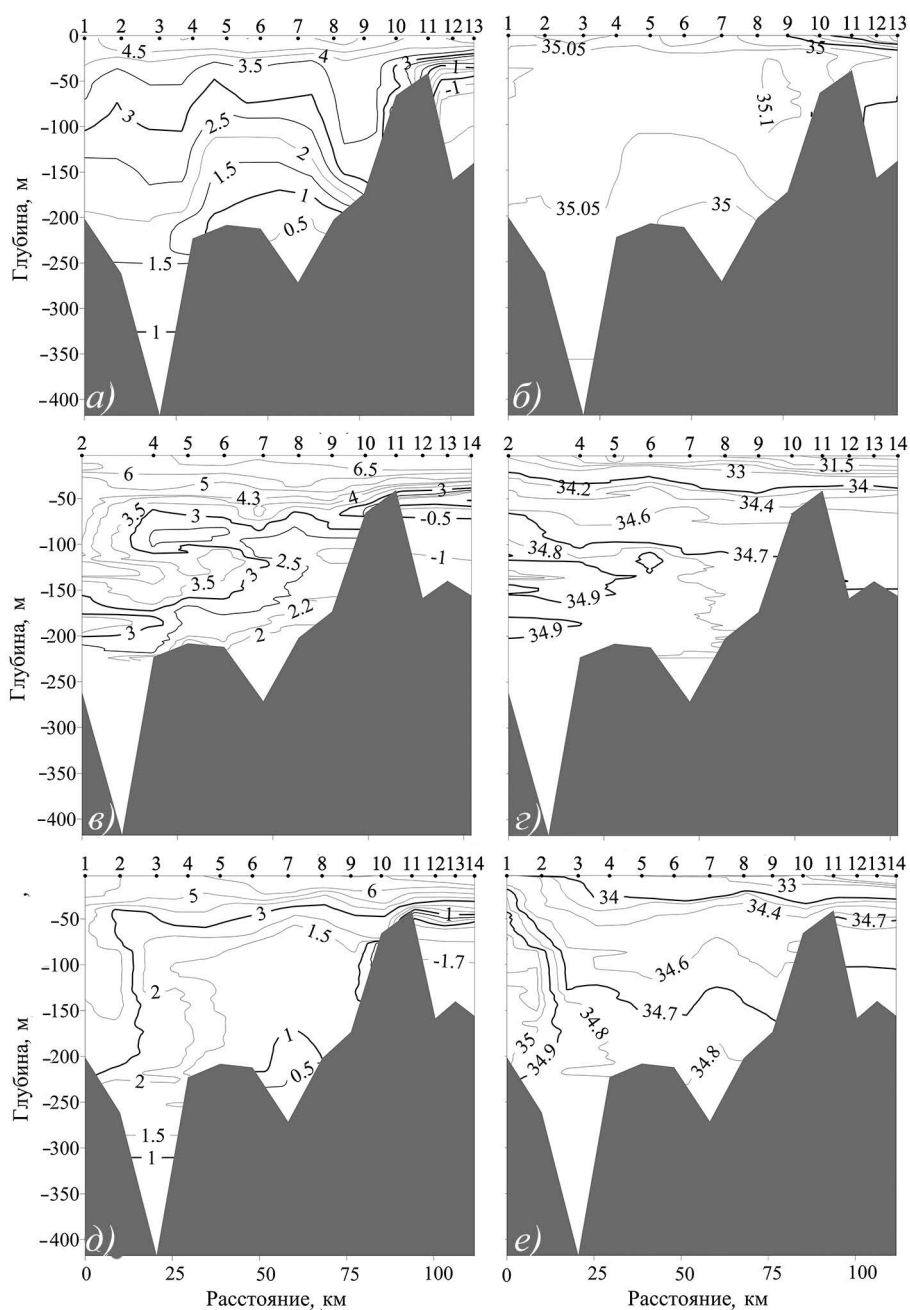


Рис. 3. Распределение температуры (а, в, д,) и солёности (б, г, е,) вдоль оси Ис-фьорда в июне 2014 г. (а, б), в августе 2016 г. (в, г), в июле 2017 г. (д, е)

Fig. 3. Distribution of temperature (а, в, д,) and salinity (б, г, е,) in Isfjorden in June 2014 (а, б), in August 2016 (в, г), in July 2017 (д, е)

вследствие чего эти более холодные и, соответственно, более плотные слои стали опускаться [17].

Гипотезу, что АВ находилась в акватории Ис-фьорда длительное время, подтверждает съемка, выполненная в апреле 2014 г. в Грён-фьорде (разрез вдоль оси Грён-фьорда, рис. 2), по результатам которой было зафиксировано, что вся акватория Грён-фьорда была занята водной массой со значениями солёности выше 35 ‰ и значениями температуры 2,2–2,6 °C.

Хотелось бы отметить, что ситуация, когда фьорды Западного Шпицбергена практически полностью заполняются АВ, является редкой, но не уникальной. Такие события были зафиксированы по результатам измерений в Конгс-фьорде в апреле 2002, 2006, 2007 гг. [17], в летние месяцы 2014 г. [14]. Объясняются такие массовые затопы АВ в глубь фьорда сложившейся атмосферной ситуацией [11, 18].

В сентябре 2015 г. был выполнен только один разрез в горле Ис-фьорда до глубины 128 м. От поверхности до 40–50 м залегала ПВ со значениями температуры от 2 до 4,4 °C и солёности от 31,4 до 34 ‰. Под ПВ располагалась ПрВ до глубины 60–80 м у северного берега фьорда, до 128 м (последний измеренный горизонт) у южного берега. Максимальные значения температуры выше 5,5 °C были зафиксированы на глубине 70–75 м. Под ПрВ располагалась АВ со значениями температуры 4–5 °C и солёности 34,9–35 ‰.

Толщина ПВ в августе 2016 г. изменялась от 25 м в горле Ис-фьорда до 40 м в восточной части фьорда (станция 11). Значения температуры увеличивались от 3 °C до 7 °C, а солёности уменьшались от 34 до 31 ‰ с запада на восток (рис. 3в, з, станции 1–11). В Ис-фьорде под ПВ до глубин 100–120 м залегала ПрВ со значениями температуры от 1 до 5 °C. В Ис-фьорде под ПрВ была зафиксирована ТАВ, температура которой варьировалась от 2 до 2,5 °C. При этом в западной части разреза (станции 2–4) была зафиксирована АВ с температурой 4–4,3 °C и солёностью 34,9–35,4 ‰, располагающаяся на глубине 120–200 м.

В июле 2017 г. в Ис-фьорде ПВ со значениями температуры 3–6,5 °C и солёности 33–34 ‰ была зафиксирована от поверхности до глубины 30 м. Под ПВ до глубины 40 м в районе горла фьорда и до глубины 130–150 м в остальной части разреза располагалась ПрВ. Под ПрВ в западной части разреза на глубине 40–230 м залегала АВ со значениями температуры 3–4 °C (рис. 3д, е, станции 1–11). В остальных районах фьорда под ПрВ залегала ТАВ. Во впадинах под ТАВ до дна располагалась ЛВ, оставшаяся здесь с осенне-зимнего периода.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДНЫХ МАСС В АКВАТОРИИ БИЛЛЕ-ФЬОРДА В ЛЕТНИЕ МЕСЯЦЫ 2014, 2016–2017 гг.

В Билле-фьорде в 2014 гг. от поверхности до глубины 20–30 м располагалась ПрВ с минимальными значениями солёности 34,3 ‰ (рис. 3а, б, станции 11–13). В слое от 20–30 до 40 м была зафиксирована АВ (солёность выше 34,9 ‰), поступающая сюда из Ис-фьорда. Под АВ залегала ЛВ от 40 до 50 м, ниже ЗВ с минимальными значениями температуры –1,6 °C и значениями солёности выше 34,9 ‰.

Толщина ПВ в августе 2016 г. в Билле-фьорде составила 40 м. Максимальные значения температуры достигали 6,5–7 °C, а минимальные значения солёности составили 25 ‰ (рис. 3в, з, станции 11–14). ПрВ располагалась до горизонта 60 м. Под ПрВ от 60 м до дна наблюдались водные массы местного происхождения: ЛВ —

60–75 м, температура $-0,5...+1$ °С, соленость 34,5–34,6 ‰ и ЗВ — 75 м – дно, температура $-1...-0,5$ °С, соленость 34,6–34,7 ‰.

Съемка в июле 2017 г. показала схожее с 2016 г. распределение водных масс в Билле-фьорде (рис. 3д, е, станции 11–14): ПВ залегала от поверхности до глубины 30–40 м, максимальные значения температуры 7–8 °С были зафиксированы в куте Билле-фьорда, ПрВ располагалась от 30–40 м до глубины 40–50 м, ЛВ — от 50 до 60 м, ЗВ от 60 м до дна (минимальные значения температуры $-1,7$ °С).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДНЫХ МАСС В АКВАТОРИИ ГРЁН-ФЬОРДА В ЛЕТНИЕ МЕСЯЦЫ 2011–2017 гг.

В августе 2011 г. в Грён-фьорде ПВ с минимальными значениями солености до 3,7 ‰ в куте фьорда наблюдалась от поверхности до глубин 50 м (рис. 4а, б). Температура поверхностного слоя варьировалась от 1 до 4 °С, что на несколько градусов ниже значений температуры поверхностного слоя, полученных в последующие годы. Скорее всего, это связано с тем, что в 2011 г. в зимне-весенний период наличествовал более мощный ледяной покров и даже припай, что препятствовало радиационному прогреву поверхностных вод по сравнению с остальными годами, когда наблюдался в основном битый лед и акватория раньше освобождалась от ледяного покрова. Под ПВ до глубины 90–10 м была зафиксирована ПрВ с максимальными значениями температуры 2,5 °С. Под ПрВ до дна залегала ТАВ. Исключение составили станции, расположенные в горле фьорда: здесь под ТАВ на горизонтах от 110 м до дна была зафиксирована АВ.

В августе 2012 г. общая картина распределения водных масс была схожа с августом 2011 г. Для ПВ, залегающей до глубин 30–35 м, были характерны более высокие значения температуры (от 3 до 9 °С). Аналогично 2011 г. наблюдался сильно распресненный верхний 10-метровый слой, минимальные значения солености составили 27 ‰ (рис. 4в, г). Нижняя граница ПрВ располагалась на глубине 70–110 м. Под слоем ПрВ наблюдалась ТАВ со значениями температуры от 1,5 до 2,5 °С.

В сентябре 2013 г. в Грён-фьорде ПВ с минимальными значениями солености до 32 ‰ наблюдалась от поверхности до глубин 40–50 м (рис. 4д, е). При этом значения температуры поверхностного слоя варьировались от 6 до 6,2 °С. ПрВ залегала под ПВ до горизонтов 90–110 м. В южной части разреза ПрВ залегала до дна. Под ПрВ была зафиксирована АВ со значениями температуры до 4,6 °С и соленостью до 35 ‰.

В июне 2014 г. в горле Грён-фьорда (рис. 2) аналогично Ис-фьорду вся толща воды была занята АВ со значениями температуры от 3,5 до 5 °С и соленостью ~35,1 ‰.

В августе 2015 г. в Грён-фьорде были зафиксированы три водные массы: ПВ, ПрВ и ТАВ. Нижняя граница ПВ располагалась на глубине 60–80 м. Максимальные значения температуры составили 9 °С, минимальные значения солености 24 ‰ (рис. 5а, б). Под ПВ вдоль всего разреза была зафиксирована ПрВ с максимальными значениями температуры 2,5 °С. ТАВ наблюдалась в горле и центральной части фьорда в придонных горизонтах толщиной 10–40 м (от 120–140 м до дна). Температура ТАВ составила 2–2,5 °С, соленость 34,7–34,8 ‰.

В августе 2016 г. ПВ располагалась от поверхности до глубины 20–40 м. Максимальные значения температуры достигали 8 °С, минимальные значения солености 30 ‰. ПрВ характеризовалась более высокими значениями температуры (4,5–5,8 °С) относительно предыдущих годов (рис. 5в, г). Нижняя граница ПрВ была зафиксиро-

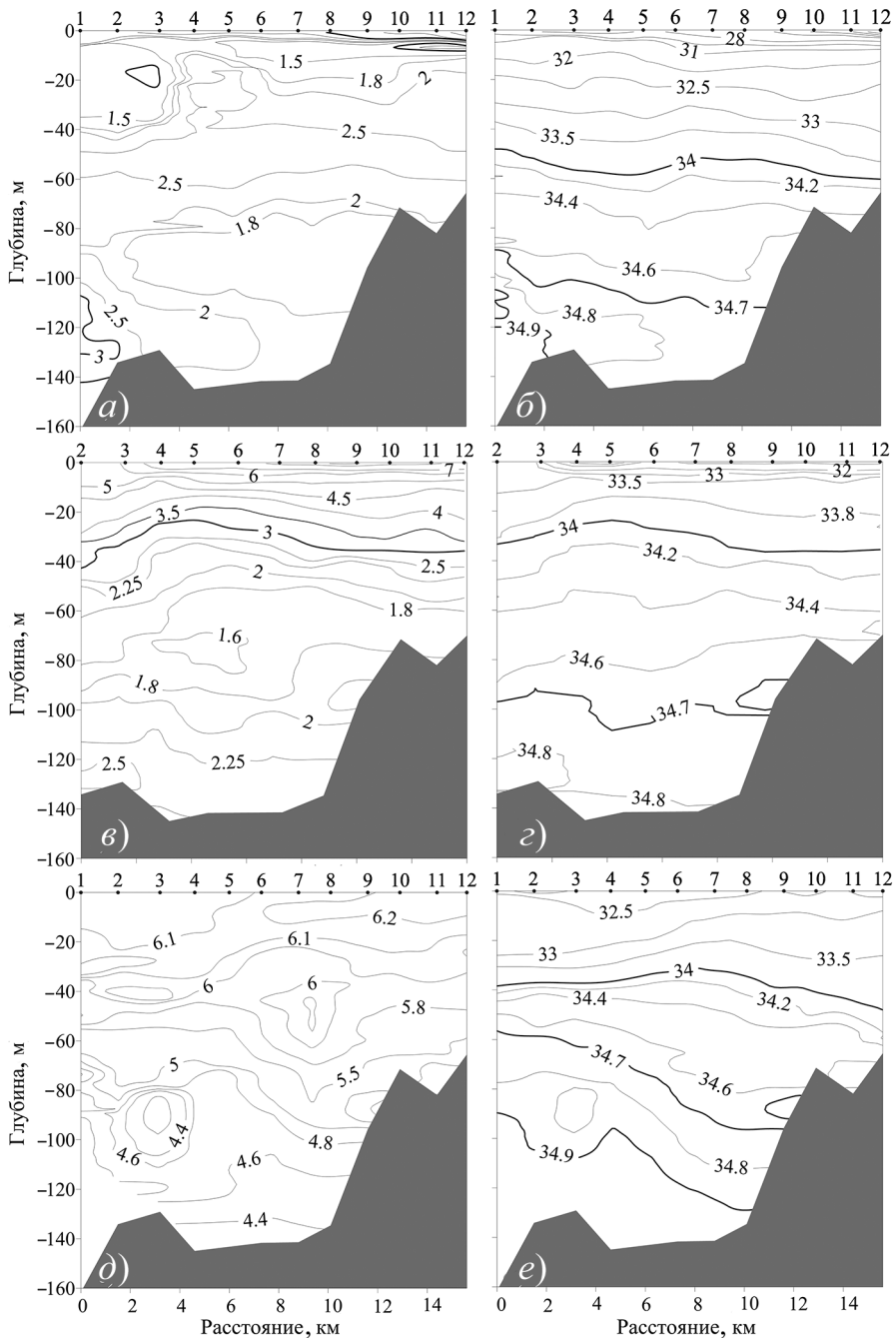


Рис. 4. Распределение температуры (а, в, д) и солёности (б, г, е) вдоль оси Грён-фьорда в августе 2011 г. (а, б), в августе 2012 г. (в, г) и в сентябре 2013 г. (д, е)

Fig. 4. Distribution of temperature (а, в, д) and salinity (б, г, е) in Grönfjorden in August 2011 (а, б), in August 2012 (в, г) and in September 2013 (д, е)

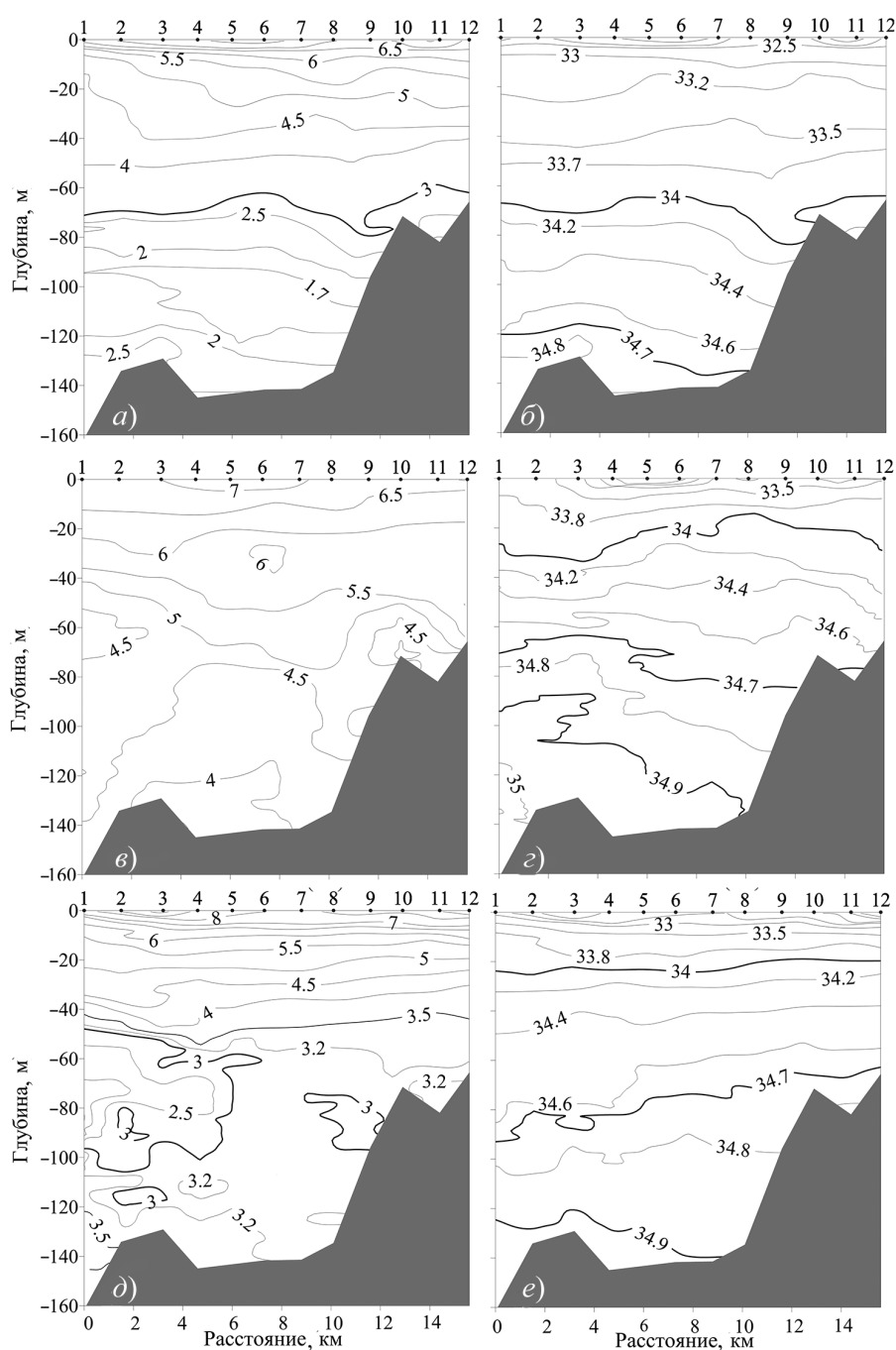


Рис. 5. Распределение температуры (а, в, д) и солёности (б, г, е) вдоль оси Грён-фьорда в августе 2015 г. (а, б), в августе 2016 г. (в, г) и в августе 2017 г. (д, е)

Fig. 5. Distribution of temperature (а, в, д) and salinity (б, г, е) in Grönfjorden in August 2015 (а, б), in August 2016 (в, г) and in August 2017 (д, е)

рована на глубине 90–130 м, постепенно заглубляясь с севера на юг. Под ПрВ практически во всех районах фьорда, за исключением южной периферии, наблюдалась АВ. Температура АВ варьировалась от 3,9 до 4,9 °С, соленость от 34,9 до 35,1 ‰.

В августе 2017 г. в Грэн-фьорде были зафиксированы четыре водные массы: ПВ, ПрВ, ТАВ и АВ. ПВ наблюдалась от поверхности до глубин 20–25 м (рис. 5д, е). При этом значения температуры поверхностного слоя варьировались от 5 до 9 °С. Под ПВ залегала ПрВ до 80 м в северной части разреза и до дна в центральной и южной частях разреза. Под ПрВ в северной части разреза от 80 до 110 м и на станции 9 от 80 м до дна была зафиксирована ТАВ. Глубже 120 м и до дна на станциях 1–7 была зафиксирована АВ со значениями температуры до 3,5 °С и соленостью до 35,1 ‰.

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД ФЬОРДОВ

Для оценки межгодовой изменчивости для каждого из фьордов были рассчитаны следующие характеристики:

- средняя температура и соленость фьорда (T_m и S_m);
- среднее содержание пресных вод (FCW). Расчет содержания пресных вод производился для каждого вертикального профиля по следующей формуле:

$$FCW = \sum_{z_0}^z \frac{S_{ref} - S}{S_{ref}}, \quad (1)$$

где S_{ref} — референсная соленость, S — измеренная соленость, z_0 — первый горизонт, z — последний горизонт. В качестве референсной солености было взято значение 34,2 ‰, полученное для одного из фьордов Западного Шпицбергена (Хорнсунн) на основе измерений, выполненных в апреле 2012 и мае 2011 и 2013 гг. [14]. После расчета содержания пресных вод для каждого измеренного профиля было получено среднее содержание пресных вод для фьорда;

- теплосодержание (Q). Расчет производился для каждого вертикально профиля по следующей формуле:

$$Q = Cp(t - t_0)V, \quad (2)$$

где t — температура воды; t_0 — температура замерзания воды при данной солености; C — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С); ρ — плотность воды, кг/м³; V — объем, м³. Расчет теплосодержания выполнялся для верхнего 40-метрового слоя. Выбор толщины слоя для расчета теплосодержания обусловлен тем, что измерения во фьордах в повторяющихся точках производились каждый год до разных горизонтов, а не до дна. Поэтому во избежание неправильной интерпретации результатов расчетов и получения неверных выводов при анализе межгодовой изменчивости теплосодержания был выбран слой 40 м, так как измерения до этого горизонта проводились ежегодно. После расчета теплосодержания для каждого измеренного профиля было получено среднее теплосодержание для фьорда.

Для расчета вышеперечисленных характеристик из исходных данных были получены профили с вертикальным разрешением 1 м. Вычисления производились только для станций, измерения на которых выполнялись в течение всего периода исследований: для Ис-фьорда и Билле-фьорда в 2014, 2016–2017 гг., для Грэн-фьорда в 2011–2013, 2015–2017 гг.

Также по результатам измерений было определено максимальное значение температуры (T_{max}) и солености (S_{max}) слоя АВ, зафиксированное во фьорде в тот или иной год.

Характеристики вод фьордов в летнее время

Годы	T_m , °C	S_m , ‰	FCW , м	Q , МДж	T_{max} АВ, °C	S_{max} АВ, ‰	ΔT , °C	ΔS , ‰
Ис-фьорд								
2014	2,95	35,07	0,00	946,25	5,21	35,14	-0,42	0,34
2016	4,21	34,57	0,84	1280,29	6,85	35,37	0,84	-0,16
2017	2,94	34,54	0,51	1120,79	4,65	35,08	-0,43	-0,18
Среднее	3,37	34,73	0,45	1115,78	—	—	—	—
Билле-фьорд								
2014	1,73	34,91	0,00	729,73	4,13	35,10	-1,63	0,18
2016	3,62	33,18	2,21	1214,34	—	—	0,26	-1,54
2017	2,96	33,82	1,22	1089,88	—	—	-0,40	-0,91
Среднее	2,77	33,97	1,14	1011,32	—	—	—	—
Грэн-фьорд								
2011	2,09	32,72	3,20	597,37	3,50	35,06	-2,11	-1,00
2012	3,04	34,00	0,69	939,63	—	—	-1,16	0,27
2013	5,76	33,84	1,13	1312,56	4,94	35,02	1,57	0,11
2015	4,33	33,44	1,72	1166,40	—	—	0,13	-0,29
2016	5,59	34,20	0,42	1322,42	5,50	35,17	1,40	0,47
2017	4,36	34,17	0,53	1171,91	3,75	35,10	0,17	0,44
Среднее	4,19	33,73	1,28	1085,05	—	—	—	—

После расчета средней температуры фьорда за период исследования были получены аномалии температуры (ΔT , °C) и солёности (ΔS , ‰) АВ фьорда для каждого года (аномалия температуры (солёности) рассчитывалась как разница между средним значением температуры (солёности) воды за весь исследуемый период и средним значением температуры (солёности) воды за конкретный год).

Результаты расчета характеристик представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, средняя температура воды в Ис-фьорде за период исследования составила 3,37 °C. Максимальное значение средней температуры (4,21 °C) и теплосодержания (1280,29 МДж) фьорда было зафиксировано в 2016 г. Также именно в 2016 г. было зафиксировано максимальное значение температуры (6,85 °C) и солёности (35,37 ‰) слоя АВ. Это превышает зафиксированный ранее исторический максимум температуры АВ в 2006 г. [19] почти на 0,5 °C. Обращает на себя внимание 2014 г., когда содержание пресных вод во фьорде было равно 0 м, а средняя солёность составила 35,07‰. Такая же высокая средняя солёность 35,00 ‰ была зафиксирована и в другом фьорде Западного Шпицбергена — Конгс-фьорде по результатам съемки в августе 2014 г. [14]. При этом значение средней температуры вод Конгс-фьорда (4,54 °C) было значительно выше значения средней температуры вод Ис-фьорда (2,95 °C). Именно в 2014 г. были зафиксированы минимальные значения объема пресных вод не только в Ис-фьорде, но и в Конгс-фьорде, и во фьорде Хорнсунн за период с 2001 по 2015 г. [14].

Особенности распределения характеристик вод Билле-фьорда схожи с Ис-фьордом: максимальное значение средней температуры (3,62 °C) и теплосодержания верхнего 40-метрового слоя (1214,34 МДж) было зафиксировано в 2016 г. Максимальное значение средней солёности вод фьорда и минимальное значение

содержания пресных вод наблюдалось тоже в июне 2014 г. Слой АВ был зафиксирован только в 2014 г. В целом воды Билле-фьорда характеризовались меньшими значениями средней температуры и солёности и теплосодержания и более высокими значениями содержания пресных вод.

Наиболее длительные наблюдения были выполнены в Грён-фьорде. Как и для остальных фьордов, максимальные значения средних солёности (34,2 ‰) и теплосодержания были зафиксированы в 2016 г. Максимальное же значение средней температуры вод фьорда наблюдалось в 2013 г. (5,76 °C) и близкое к нему в 2016 г. (5,6 °C). Наиболее холодным годом с минимальными значениями средней солёности (32,72 ‰) и с максимальными значениями отрицательных аномалий температуры (–2,11 °C) и солёности (–1,00 ‰) от среднего за период наблюдений являлся 2011 г. АВ были зафиксированы в 2011, 2013, 2016 и 2017 гг. Максимальные значения температуры (5,5 °C) и солёности (35,17 ‰) слоя АВ наблюдались, как и в Ис-фьорде, в 2016 г. При этом максимальное значение температуры в слое АВ (5,5 °C), зафиксированное в 2016 г., ниже почти на 0,5 °C исторического максимума, наблюдавшегося в 2006 г. [19].

В целом для Грён-фьорда в 2016 и 2017 гг. характерны более высокие значения средней температуры и теплосодержания и более низкие значения средней солёности по сравнению с Ис-фьордом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для Ис-фьорда в летний период 2015–2017 гг. характерным являлось наличие четырех водных масс: ПВ, располагающейся на глубинах от поверхности до 30–40 м, ПрВ, залегающей под ПВ, ТАВ и АВ.

Распределение ТАВ и АВ в акватории фьорда имело сложную структуру, а их объем характеризовался значительной межгодовой изменчивостью. АВ чаще всего была представлена в виде одного или нескольких «язычков», максимальный объем АВ наблюдался в основном вблизи горла Ис-фьорда.

В июне 2014 г. была зафиксирована ситуация, когда вся акватория фьорда была занята АВ. Схожая с Ис-фьордом ситуация наблюдалась и в других фьордах Западного Шпицбергена — Конгс-фьорде и фьорде Хорнсунн — в летние месяцы 2014 г. [14]. Именно 2014 г. стал самым «солёным» для фьордов Западного Шпицбергена: для Ис-фьорда и Билле-фьорда за 2014–2017 гг., для Конгс-фьорда и фьорда Хорнсунн за 2001–2015 гг.

Для Билле-фьорда в летние месяцы 2016–2017 гг. было характерно наличие четырех водных масс: ПВ, ПрВ, ЛВ и ЗВ. ЗВ занимала толщу вод от глубины 60 м до дна. Над ней располагалась ЛВ в слое от 40–50 м до 60 м. В 2014 г. из-за сложившейся гидрологической ситуации в Ис-фьорде отсутствовала ПВ. В поверхностном слое была зафиксирована ПрВ, под ней АВ. ЗВ и ЛВ характеризовались высокими значениями солёности по сравнению с остальными годами (в среднем на 0,2 ‰), что также связано с особенностями гидрологической ситуации в Ис-фьорде. Минимальные значения температуры ЗВ (–1,8 °C) были зафиксированы в июле 2017 г., максимальные значения солёности в 2016 г. (34,98 ‰).

Для Грён-фьорда в летний период 2011–2013 и 2015–2017 гг. было характерно наличие четырех водных масс: ПВ, ПрВ, ТАВ и АВ. Минимальные значения солёности ПВ — 3,7 ‰ — были зарегистрированы в августе 2011 г., максимальные значения температуры ПВ — 9,2 °C — в июле 2017 г. В общем, для Грён-фьорда

характерна значительная межгодовая изменчивость объема различных водных масс, присутствующих во фьорде.

В 2016 г. был зафиксирован новый исторический максимум температуры в слое АВ в Ис-фьорде (6,8 °С), что почти на 0,5 °С выше предыдущего рекорда, наблюдавшегося в 2006 г. [19]. Также в 2016 г. были зафиксированы максимальные средние значения температуры и теплосодержания в верхнем 40-метровом слое в Ис-фьорде, Билле-фьорде и Грэн-фьорде за исследуемый период.

Благодарности. Сбор материала осуществлен в рамках экспедиций «Шпицберген-2011» — «Шпицберген-2017» Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) ААНИИ. Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность отделу координации и планирования научных исследований РАЭ-Ш за постоянное внимание к работе и качественную организацию экспедиций, а также сотрудникам зимовочного состава РАЭ-Ш в поселке Баренцбург за оказанное содействие при выполнении полевых исследований.

Acknowledgments. Data collection was conducted within the expeditions “Spitsbergen-2011” — “Spitsbergen-2017” organised by Russian Scientific Arctic Expedition on Spitsbergen Archipelago (RAE-S), AARI. The authors feel it their pleasant duty to express their gratitude to the Department for Coordination and Planning of Scientific Research RAE-S for constant attention to the work and the qualitative organization of the expeditions, as well as to the wintering staff of the RAE-S in Barentsburg for their assistance in the field research.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Schauer U., Beszczynska Möller A., Walczowski W., Fahrbach E., Piechura J., Hansen E. Variation of Measured Heat Flow Through the Fram Strait Between 1997 and 2006 // Arctic Subarctic Ocean Fluxes: defining the role of the northern seas in climate / Dickson R.R., Meincke J., Rhines P. (eds). Dordrecht: Springer, 2008. P. 65–85.
2. Aagaard K., Greisman P. Toward new mass and heat budgets for the Arctic Ocean // Journal of Geophysical Research. 1975. V. 80. P. 3821–3827.
3. Walczowski W., Piechura J. Pathways of Greenland Sea warming. Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. doi: 10.1029/2007GL029974.
4. Haarpaintner J., O'Dwyer J., Gascard J.C., Haugan P.M., Schauer U., Østerhus S. Seasonal transformation of water masses, circulation and brine formation observed in Storfjorden Svalbard // Annales of Glaciology. 2001. V. 33. P. 437–443.
5. Bischof J. Ice Drift, ocean circulation and climate change. Chichester: Wilcy/Praxis, 2000. 215 p.
1. Schauer U., Beszczynska Möller A., Walczowski W., Fahrbach E., Piechura J., Hansen E. Variation of Measured Heat Flow Through the Fram Strait Between 1997 and 2006. Arctic Subarctic Ocean Fluxes: defining the role of the northern seas in climate. Dickson R.R., Meincke J., Rhines P. (eds). Dordrecht: Springer, 2008: 65–85.
2. Aagaard K., Greisman P. Toward new mass and heat budgets for the Arctic Ocean. Journal of Geophysical Research. 1975, 80: 3821–3827.
3. Walczowski W., Piechura J. Pathways of Greenland Sea warming. Geophysical Research Letters. 2007, 34. doi: 10.1029/2007GL029974.
4. Haarpaintner J., O'Dwyer J., Gascard J.C., Haugan P.M., Schauer U., Østerhus S. Seasonal transformation of water masses, circulation and brine formation observed in Storfjorden Svalbard. Annales of Glaciology. 2001, 33: 437–443.
5. Bischof J. Ice Drift, ocean circulation and climate change. Chichester: Wilcy/Praxis, 2000: 215 p.

6. *Saloranta T.M., Svendsen H.* Across the Arctic Front west of Spitsbergen: high-resolution CTD sections from 1998–2000 // *Polar Research*. 2001. V. 20. P. 177–184.

7. *Węslawski J. M., Koszteyn J., Zajczkowski M., Wiktor J., Kwaśniewski S.* Fresh water in the Svalbard fjord ecosystem // *Ecology of fjords and coastal waters: Proceedings of the Mare Nor symposium on the ecology of fjords and coastal waters*, Tromsø, Norway, 5–9 December 1994. / H.R. Skjoldal, C. Hopkins, K.E. Erikstad, H.P. Leinaas (eds.). Amsterdam: Elsevier, 1995. P. 229–241.

8. *Cottier F. R., Nilsen F., Skogseth R., Tverberg V., Skarðhamar J., Svendsen H.* Arctic fjords: A review of the oceanographic environment and dominant physical processes / J.A. Howe et al (eds). *Fjord Systems and Archives*. London: Geol. Soc. Spec. Publ., 2010. P. 35–50.

9. *Muckenhuber S., Nilsen F., Korosov A. Sandven S.* Sea ice cover in Isfjorden and Hornsund, Svalbard (2000–2014) from remote sensing data // *The Cryosphere*. 2016. V.10. P. 149–158.

10. *Nilsen F., Cottier F., Skogseth R., Mattsson S.* Fjord shelf exchange controlled by ice and brine production: the interannual variation of Atlantic Water in Isfjorden, Svalbard // *Continental Shelf Research*. 2008. V. 28. P. 1838–1853.

11. *Cottier F.R., Nilsen F., Inall M.-El, Gerland S., Tverberg V., Svendsen H.* Wintertime warming of an Arctic shelf in response to largescale atmospheric circulation // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. doi:10.1029/2007GL029948.

12. *Hop H., Pearson T., Hegseth E.N., Kovacs K.M., Wiencke C., Kwasniewski S., Eiane K., Mehlum F., Gulliksen B., Włodarska-Kowalczyk M., Lydersen C., Weslawski J.M., Cochrane S., Gabrielsen G.W., Leakey R.J.G., Lonne O.J., Zajczkowski M., Falk-Petersen S., Kendall M., Wangberg S. A., Bischof K., Voronkov A.Y., Kovaltchouk N.A., Wiktor J., Poltermann M., di Prisco G., Papucci C., Gerland S.* The marine ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard // *Polar Research*. 2002. V. 21. P. 167–208.

13. *Łączka M., Zajczkowski M.* Does the recent pool of benthic foraminiferal tests in fjordic surface sediments reflect interannual environmental changes? The resolution limit of the foraminiferal record // *Annales Societatis Geologorum Poloniae*. 2016. V. 86. P. 59–71.

6. *Saloranta T.M., Svendsen H.* Across the Arctic Front west of Spitsbergen: high-resolution CTD sections from 1998–2000. *Polar Research*. 2001, 20: 177–184.

7. *Węslawski J. M., Koszteyn J., Zajczkowski M., Wiktor J., Kwaśniewski S.* Fresh water in the Svalbard fjord ecosystem. *Ecology of fjords and coastal waters: Proceedings of the Mare Nor symposium on the ecology of fjords and coastal waters*, Tromsø, Norway, 5–9 December 1994. H.R. Skjoldal, C. Hopkins, K.E. Erikstad, H.P. Leinaas (eds.). Amsterdam: Elsevier, 1995: 229–241.

8. *Cottier F. R., Nilsen F., Skogseth R., Tverberg V., Skarðhamar J., Svendsen H.* Arctic fjords: A review of the oceanographic environment and dominant physical processes. J.A. Howe et al (eds). *Fjord Systems and Archives*. London: Geol. Soc. Spec. Publ., 2010: 35–50.

9. *Muckenhuber S., Nilsen F., Korosov A. Sandven S.* Sea ice cover in Isfjorden and Hornsund, Svalbard (2000–2014) from remote sensing data. *The Cryosphere*. 2016, 10: 149–158.

10. *Nilsen F., Cottier F., Skogseth R., Mattsson S.* Fjord shelf exchange controlled by ice and brine production: the interannual variation of Atlantic Water in Isfjorden, Svalbard. *Continental Shelf Research*. 2008, 28: 1838–1853.

11. *Cottier F. R., Nilsen F., Inall M.-El, Gerland S., Tverberg V., Svendsen H.* Wintertime warming of an Arctic shelf in response to largescale atmospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.* 2007, 34. doi:10.1029/2007GL029948.

12. *Hop H., Pearson T., Hegseth E.N., Kovacs K.M., Wiencke C., Kwasniewski S., Eiane K., Mehlum F., Gulliksen B., Włodarska-Kowalczyk M., Lydersen C., Weslawski J.M., Cochrane S., Gabrielsen G.W., Leakey R.J.G., Lonne O.J., Zajczkowski M., Falk-Petersen S., Kendall M., Wangberg S. A., Bischof K., Voronkov A.Y., Kovaltchouk N.A., Wiktor J., Poltermann M., di Prisco G., Papucci C., Gerland S.* The marine ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Research*. 2002, 21: 167–208.

13. *Łączka M., Zajczkowski M.* Does the recent pool of benthic foraminiferal tests in fjordic surface sediments reflect interannual environmental changes? The resolution limit of the foraminiferal record. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*. 2016, 86: 59–71.

14. *Promińska A., Cizek M., Walczowski W.* Kongsfjorden and Hornsund hydrography—comparative study based on a multiyear survey in fjords of west Spitsbergen // *Oceanologia*. 2017. V. 59. doi.org/10.1016/j.oceano.2017.07.003.
15. *Nilsen F., Gjevik, B., Schauer U.* Cooling of the West Spitsbergen Current: isopycnal diffusion by topographic vorticity waves // *Journal of Geophysical Research*. 2006. V. 111. doi: 10.1029/2005JC002991.
16. *Svendsen H., Beszczynska Moller A., Hagen J.O., Lefauconnier B., Tverberg V., Gerland S., Orbaek J.B., Bischof K., Papucci C., Zajackowski M., Azzolini R., Bruland O., Wiencke C., Winther J.-G., Dallmann W.* The physical environment of Kongsfjorden—Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard // *Polar Research*. 2002. V. 21. P. 133–166.
17. *Tverberg V., Nilsen F., Goszczko I., Cottier F., Svendsen H., Gerland S.* The warm winter temperatures of 2006 and 2007 in the Kongsfjorden water masses compared to historical data / R. Azzolini (eds). 8th Ny Alesund seminar Polarnet technical report. Rome: Earth and Environment Department, National Research Council, 2007. P. 40–44.
18. *Nilsen F., Skogseth R., Vaardal Lunde J., Inall M.* A Simple Shelf Circulation Model: Intrusion of Atlantic Water on the West Spitsbergen Shelf // *Journal of Physical Oceanography*. 2016. V. 46. № 4. P. 1209–1230.
19. *Pavlov A.K., Tverberg V., Ivanov B.V., Nilsen F., Falk Petersen S., Granskog, M.A.* Warming of Atlantic Water in two Spitsbergen fjords over the last century (1912–2009) // *Polar Res*. 2013. V. 32. № 1. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v32i0.11206> (дата обращения 06.07.2018).
14. *Promińska A., Cizek M., Walczowski W.* Kongsfjorden and Hornsund hydrography—comparative study based on a multiyear survey in fjords of west Spitsbergen. *Oceanologia*. 2017, 59. doi.org/10.1016/j.oceano.2017.07.003.
15. *Nilsen F., Gjevik, B., Schauer U.* Cooling of the West Spitsbergen Current: isopycnal diffusion by topographic vorticity waves. *Journal of Geophysical Research*. 2006, 111. doi: 10.1029/2005JC002991.
16. *Svendsen H., Beszczynska Moller A., Hagen J.O., Lefauconnier B., Tverberg V., Gerland S., Orbaek J.B., Bischof K., Papucci C., Zajackowski M., Azzolini R., Bruland O., Wiencke C., Winther J.-G., Dallmann W.* The physical environment of Kongsfjorden—Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard. *Polar Research*. 2002, 21: 133–166.
17. *Tverberg V., Nilsen F., Goszczko I., Cottier F., Svendsen H., Gerland S.* The warm winter temperatures of 2006 and 2007 in the Kongsfjorden water masses compared to historical data. R. Azzolini (eds). 8th Ny Alesund seminar Polarnet technical report. Rome: Earth and Environment Department, National Research Council, 2007: 40–44.
18. *Nilsen F., Skogseth R., Vaardal Lunde J., Inall M.* A Simple Shelf Circulation Model: Intrusion of Atlantic Water on the West Spitsbergen Shelf. *Journal of Physical Oceanography*. 2016, 46, 4: 1209–1230.
19. *Pavlov A.K., Tverberg V., Ivanov B.V., Nilsen F., Falk Petersen S., Granskog, M.A.* Warming of Atlantic Water in two Spitsbergen fjords over the last century (1912–2009). *Polar Res*. 2013, 32, 1. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v32i0.11206> (accessed 06.07.2018).