

ДОЛГОПЕРИОДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД ВО ФЬОРДАХ ОСТРОВА ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН В ПЕРИОД ПЕРВОГО (1920–1940 гг.) И СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ В АРКТИКЕ

инженер Д.И. ТИСЛЕНКО^{1,2} канд. геогр. наук Б.В. ИВАНОВ^{2,1}

¹ – Санкт-Петербургский государственный университет, *d_tis@inbox.ru*

² – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, *e-mail: b_ivanov@aari.ru*

В последние десятилетия климат нашей планеты претерпевает серьезные изменения. Наиболее заметные климатические изменения наблюдаются в Арктическом регионе, они получили название «Арктическое усиление». Это проявляется в уменьшении площади многолетних льдов в 2007 и 2012 гг., повышении температуры промежуточных атлантических вод, повышении приземной температуры воздуха. В данной работе проведен анализ долгопериодной изменчивости температуры трансформированных атлантических вод (ТАВ) во фьордах острова Западный Шпицберген (Ис-фьорд, Грен-фьорд, Хорнсунн, Конгс-фьорд, Бельсунн) в период первого (1920–1940 гг.) и современного (1990–2010 гг.) потепления в Арктике. Показано, что данным периодам соответствует повышение температуры в слое ТАВ и приземной температуры воздуха (ПТВ) для района архипелага Шпицберген.

Ключевые слова: Арктика, Шпицберген, изменения климата, атлантические воды

ВВЕДЕНИЕ

Арктика составляет важную часть планетарной климатической системы, связанную с другими частями посредством переноса тепла и влаги в атмосфере и океане. Формирование и вынос распресненных поверхностных вод из центральной части Арктического бассейна в значительной степени влияют на распространение морских льдов, термохалинную циркуляцию в примыкающих районах Северной Атлантики, а также на региональный и глобальный климат (Алексеев, 2003; Никифоров, Шпайхер, 1980).

В XX и в первом десятилетии XXI века в Арктике наблюдались два периода значительного потепления. Первый приходится примерно на 1920–1940 гг., а второй на 1980–2010 гг. (Алексеев и др., 1998; Алексеев, Иванов, 2003; Polyakov et al., 2002; 2003; 2004). Первое потепление Арктики (1920–1940 гг.) привлекло внимание исследователей еще в первой половине прошлого века. В.Ю. Визе в статье «Причины потепления Арктики» (1937 г.) охарактеризовал потепление Арктики в 1920–1930 гг. как наиболее сильное по своим размерам климатическое колебание, зарегистрированное на тот момент с помощью регулярных метеорологических наблюдений (Визе, 1937).

В районе архипелага Шпицберген (пролив Фрама, фьорды) происходит поступление теплых и соленых атлантических вод (АВ) в центральную часть Арктического бассейна (ЦАБ) Северного Ледовитого океана. Регулярный мониторинг АВ во фьордах

острова Западный Шпицберген позволяет с количественной стороны оценить цикличность их поступления во внутренние районы АБ. В качестве удобного индикатора наблюдаемых изменений можно рассматривать среднегодовую температуру воды в слое АВ, поступающих в заливы архипелага.

Цель данного исследования — оценка долгопериодной изменчивости температуры атлантических вод во фьордах острова Западный Шпицберген (Ис-фьорд, Конгс-фьорд, Хорнсунн и Бельсунн) в период первого (1920–1940 гг.) и современного (1990 – настоящее время) потепления в Арктике.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Архипелаг Шпицберген — один из обширных полярных архипелагов, расположенный в Северном Ледовитом океане, между 74° и 81° северной широты, 10° и 35° восточной долготы. Циркуляция вод, омывающих архипелаг, определяется четырьмя основными течениями: Западно-Шпицбергенским течением (ЗШТ), Восточно-Шпицбергенским течением, Прибрежным течением и течением Южного мыса. Океанологические условия во фьордах связаны с характеристиками течений вокруг архипелага. Теплые и соленые воды поступают во фьорды с ЗШТ, являющимся северным ответвлением Норвежского течения (Hanzlick, 1993; Rudels et al., 2000; Cottier et al., 2005). Для анализа долгопериодной изменчивости термической структуры вод во фьордах архипелага Шпицберген были отобраны океанологические станции, выполненные в заливах: Ис-фьорд, Конгс-фьорд, Хорнсунн и Бельсунн.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Выбор заливов Ис-фьорд, Конгс-фьорд, Хорнсунн и Бельсунн обусловлен их географическим положением (непосредственный контакт с водами ЗШТ) и тем обстоятельством, что именно эти фьорды в наибольшей степени, по сравнению с другими районами архипелага, обеспечены данными глубоководных океанографических наблюдений.

Измерения океанографических характеристик в этих фьордах начались в конце XIX в. Массив данных на начальном этапе работы представлял собой набор океанологических станций (более 600), выполненных с 1876 по 2012 г. с различными по продолжительности перерывами между наблюдениями. Для большинства станций имелись данные по следующим океанологическим параметрам: глубина (стандартные горизонты), температура и соленость. Источники информации — архив Всероссийского научно-исследовательского гидрометеорологического института (ВНИИГМИ МЦД, г. Обнинск), архив данных Норвежского Полярного института, база данных «Северных морей», созданная в отделе взаимодействия океана и атмосферы ГНЦ ААНИИ (Кораблев и др., 2007), и данные Института океанологии Польской академии наук.

Так как большая часть наблюдений выполнялась в летние месяцы (июль – сентябрь), то для анализа изменчивости термохалинной структуры вод использовались станции, выполненные именно в этот период года. В результате были отобраны 317 океанографических станций за 1901–2009 гг., из которых наблюдениями обеспечен только 41 год (рис. 1).

Также в работе были использованы данные наблюдений за приземной температурой воздуха, собранные Норвежским Метеорологическим институтом. Временной ряд охватывает период времени с 1898 по 2013 г. (Nordli et al., 2014). Он был получен путем объединения наблюдений, проводившихся в поселке Лонгйирбюэн

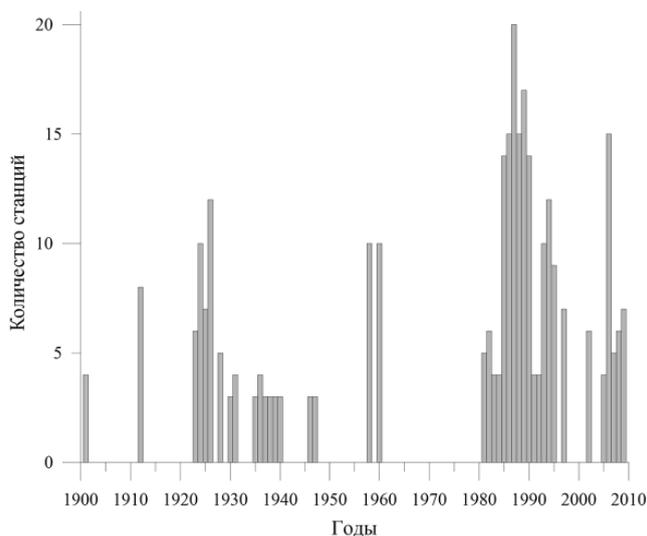


Рис. 1. Распределение океанографических станций по годам.

(административная столица Шпицбергена) и во временных пунктах наблюдений (экспедиции охотников, геологов и т.п.) в данной части архипелага. Временной ряд был сформирован с использованием специальных методов интерполяции для заполнения имеющихся пропусков (Nordli et al., 2014). Для совместного анализа использовались средние месячные данные для вышеуказанного промежутка времени.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

В ходе выполнения работы были использованы различные методы обработки данных. Предваряя описание этих методов, необходимо указать критерии для выделения атлантической водной массы (АВ). АВ имеют следующие характеристики: температура $> 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, соленость $> 34,9\text{ }‰$. Трансформированная атлантическая водная масса (ТАВ) имеет температуру и соленость в пределах $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $34,7\text{--}34,9\text{ }‰$. Она является продуктом смешения собственно АВ и местных поверхностных водных масс фьордов, образующихся там в различные сезоны года (Cottier et al., 2005).

На первом этапе производился отбор океанографических станций, имеющих одновременные измерения температуры и солености. Далее выбирались года, в течение которых в период июль–сентябрь было выполнено не менее трех океанографических станций. На втором этапе вычислялись средние значения температуры в слое ТАВ. Осреднение проводилось для каждой отдельной станции в пределах конкретного года.

Для анализа изменчивости среднегодовой температуры в слое ТАВ были рассчитаны также аномалии данной величины относительно среднего значения температуры за весь временной ряд (с 1901 по 2009 г.). При сравнительном анализе многолетней изменчивости температуры в слое ТАВ и приземной температуры воздуха использованы нормированные отклонения, которые представляют собой отношение аномалии, рассчитанной для каждого года, к среднеквадратическому отклонению соответствующего параметра. Таким образом, получены безразмерные величины, которые можно сравнивать между собой. Данный метод был впервые использован

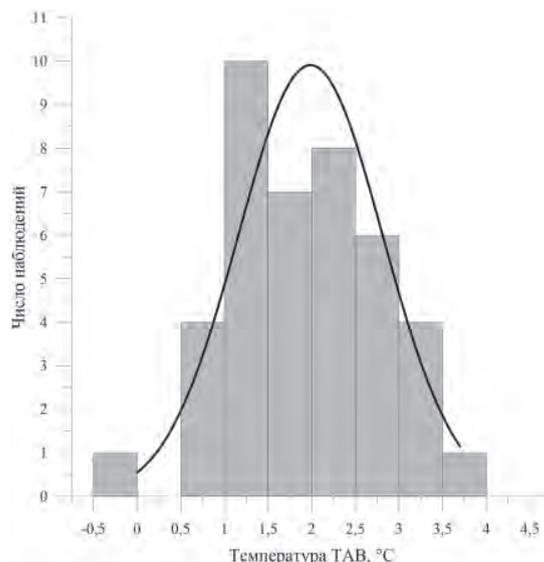


Рис. 2. Гистограмма распределения среднегодовых значений ТАВ и кривая нормального распределения (черная линия).

для анализа долгопериодной изменчивости температуры атлантических вод в работе (Алексеев, 2003).

Анализ многолетней изменчивости характеристик ТАВ осуществлялся путем расчета линейных трендов (уравнений линейной регрессии) и вычисления коэффициентов детерминации, которые характеризуют долю дисперсии, описываемую полученным уравнением. Для этого была проверена гипотеза о нормальности распределения среднегодовых значений температуры воды в слое ТАВ (рис. 2) и оценена статистическая значимость коэффициента корреляции и трендов. Оценка статистической значимости коэффициентов корреляции и линейных трендов, а также проверка гипотезы о нормальности распределения проводилась в соответствии с работой (Рожков, 2002).

Проверка гипотезы о нормальности распределения значений временного ряда ТАВ выполнена с использованием «W-теста» Шапиро–Уилка (Рожков, 2002). Результаты проверки позволяют заключить, что анализируемое распределение не отличается от нормального. Все уравнения линейной регрессии, полученные в ходе исследования, являются статистически значимыми на уровне $P < 0,05$. Исключение составляют тренды для приземной температуры воздуха в январе и декабре, которые статистически значимы на уровне $P < 0,15$.

ДОЛГОПЕРИОДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД ВО ФЬОРДАХ ЗАПАДНОГО ШПИЦБЕРГЕНА

Временная изменчивость ТАВ во фьордах архипелага Шпицберген характеризуется следующими особенностями. Первичный анализ указывает на общее увеличение средней температуры летнего сезона в слое ТАВ для всего исследуемого периода (рис. 3). В терминах линейного тренда увеличение температуры воды составляет 0,15 градуса за десятилетие, причем уравнение линейной регрессии является статистически значимым на уровне $P < 0,05$. Коэффициент детерминации составляет 0,37, то есть линейный тренд описывает не более 37 % общей дисперсии анализируемого

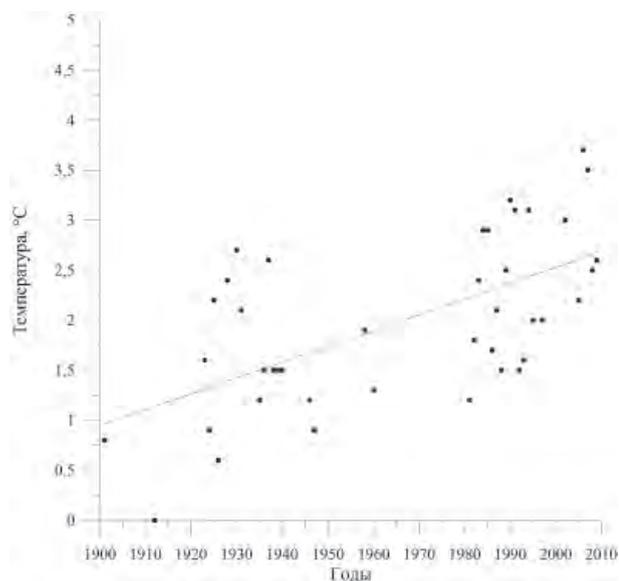


Рис. 3. Временная изменчивость летней температуры воды в слое ТАВ, представленная в виде линейного тренда, во фьордах острова Западный Шпицберген.

временного ряда, и это, по-видимому, в первую очередь объясняется значительной межгодовой изменчивостью характеристик ТАВ.

Средняя многолетняя температура воды в слое ТАВ за период 1901–2009 гг. составляет 2,0 °С. Отклонения температуры воды от средней многолетней (рис. 4) показывают два периода с положительными аномалиями температуры в слое ТАВ. Первый период приходится на 1920–1940 гг. (хорошо известное первое потепление Арктики). Второй период приходится на 1983–2009 гг. — этот период в научной литературе обозначается как так называемое быстрое потепление Арктики (Polyakov et al., 2002). На второй период приходится абсолютный максимум среднегодовой температуры воды в слое ТАВ, составляющий 3,7 °С, и в терминах отклонений от среднего современное потепление является более мощным.

В ходе анализа долгопериодной изменчивости характеристик ТАВ во фьордах острова Западный Шпицберген были рассчитаны аномалии среднегодовой температуры воды в слое распространения ТАВ. Среднее многолетнее значение температуры ТАВ

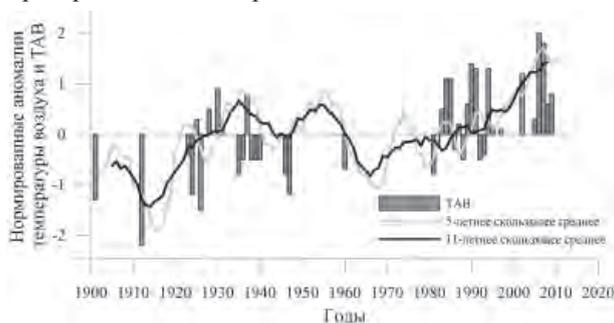


Рис. 4. Нормированные отклонения от средней температуры воздуха и температуры воды в слое ТАВ во фьордах Западного Шпицбергена.

для всего временного ряда составило 2,0 °С. Из представленных на рис. 3, 4 графиков можно сделать следующие выводы. Во-первых, выделяются два периода с положительными аномалиями среднегодовой температуры воды в слое ТАВ. Первый период приходится на 1920–1940 гг., а второй на 1983–2009 гг. Во-вторых, в терминах отклонений от среднего современное потепление является более мощным по сравнению с первым. Максимальные значения отклонений за период современного потепления составили 1,8 °С и 1,6 °С градуса и наблюдались в 2006 и 2007 гг. соответственно.

ДОЛГОПЕРИОДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Следуя основополагающим методологическим подходам (Алексеев, 2003; Визе, 1937), наряду с исследованием характеристик атлантических вод во фьордах архипелага Шпицберген проведено исследование особенностей долгопериодной изменчивости приземной температуры воздуха (ПТВ) как одной из важнейших характеристик термического режима атмосферы.

Временной ряд средних месячных значений ПТВ покрывает период с 1898 по 2013 г. (Nordli et al., 2014). Общий линейный тренд показывает увеличение ПТВ на архипелаге Шпицберген на 2,6 °С градуса за указанный период.

Также проведен анализ величины потепления в районе архипелага Шпицберген для каждого месяца года в отдельности (см. табл. 1). Рассчитаны коэффициенты линейного тренда, которые являются характеристикой средней скорости изменения температуры на рассматриваемом отрезке времени.

Таблица 1

Оценки линейного тренда ПТВ, осредненной за год и по сезонам за 1898–2013 гг.

Месяц	I*	II	III	IV	V	VI	VII
Коэффициент линейного тренда, (градус /10 лет)	0,207	0,522	0,475	0,377	0,286	0,087	0,149
Месяц	VIII	IX	X	XI	XII*	Год	
Коэффициент линейного тренда, (градус /10 лет)	0,109	0,198	0,160	0,401	0,194	0,260	

Примечание. * — месяцы, для которых уравнения линейной регрессии не являются статистически значимыми на уровне $P < 0,05$.

Линейные тренды средних месячных ПТВ положительны для всех месяцев года, причем наибольшее потепление отмечается в феврале, марте, апреле и ноябре (0,4–0,5 градуса/10 лет).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ТАВ И ПТВ В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

Для сравнительного анализа многолетней изменчивости температуры воды в слое ТАВ и ПТВ применен метод сопоставления нормированных аномалий каких-либо характеристик (Алексеев, 2003).

Многолетняя изменчивость нормированных отклонений ПТВ вследствие сильной межгодовой изменчивости представлена в виде графиков, полученных при использовании фильтров 5- и 11-летнего скользящего среднего (см. рис. 4).

При первом потеплении Арктики (1920–1940 гг.) положительные аномалии температуры воды наблюдаются в 1925–1930 гг., а положительные аномалии ПТВ смещены на

промежуток 1930–1940 гг. Для современного потепления характерны значительные положительные нормализованные отклонения температуры воды в слое ТАВ на протяжении всего периода с 1980 по 2009 г. Временной ход ПТВ в виде 5- и 11-летнего скользящего среднего для данного периода показывает, что с 1980 по 1990 г. заметных аномалий (ни положительных, ни отрицательных) не наблюдалось, а существенные нормализованные аномалии температуры воздуха наблюдаются только с середины 1990-х гг.

Следует отметить, что наличие больших пропусков во временном ряду для среднегодовых значений температуры воды в слое ТАВ не позволяет достаточно точно судить о степени корреляции (взаимосвязи) между представленными характеристиками. Однако имеет место общая тенденция изменчивости, особенно для современного периода — это увеличение температуры воды в слое ТАВ и ПТВ. Можно предположить наличие общего внешнего источника наблюдаемых изменений обеих величин. Выявить признаки запаздывания одного процесса от другого по имеющимся данным затруднительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа долгопериодной изменчивости температуры в слое ТАВ в заливах Западного Шпицбергена и ПТВ установлено:

- увеличение среднегодовой температуры для периода 1901–2009 гг. составляет 0,15 °С/10 лет;

- существование двух пиков потепления: 1920–1930-е гг. и с 1980-х гг. по настоящее время;

- современное потепление (1980 – настоящее время) является более мощным по сравнению с первым потеплением (по продолжительности, по скорости потепления и по максимальным температурам);

- увеличение среднегодовой ПТВ для периода 1898–2013 гг. составило 0,26 градуса/10 лет, причем наибольшее потепление отмечается в феврале, марте, апреле и ноябре.

Сравнительный анализ временного хода нормированных аномалий температуры воды в слое ТАВ и ПТВ в районе арх. Шпицберген показал наличие квазисинхронной изменчивости указанных характеристик. Предположительно причиной данного явления может считаться внешний источник.

Работа выполнена в рамках раздела 1.5.3.3 тематики ЦНТП Росгидромета и при финансовой поддержке Минобрнауки России при выполнении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по теме «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации» (Соглашение о предоставлении субсидии от 20.11.2014 №14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0006) и российско-норвежского проекта «Океанографические условия в фьордах архипелага Шпицберген на примере заливов Грен-фьорд и Билле-фьорд» (Арктический Университет г. Тромсё – Санкт-Петербургский государственный университет).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев Г.В. Исследования изменения климата Арктики в XX столетии // Труды ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 6–19.

Алексеев Г.В., Булатов Л.В., Захаров В.Ф., Иванов В.В. Тепловая экспансия атлантических вод в Арктическом бассейне // Метеорология и гидрология. 1998. №7. С. 69–78.

- Алексеев Г.В., Иванов Н.Е.* Региональные особенности потеплений в Арктике в 1930-е и 1990-е годы // Труды ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 4–47.
- Визе В.Ю.* Причины потепления Арктики // Сов. Арктика. 1937. № 1. С. 10–19.
- Кораблев А.А., Пнюшков А.В., Смирнов А.В.* Создание океанографической базы данных для мониторинга климата в Североевропейском бассейне Арктики // Труды ААНИИ. 2007. Т. 447. С. 85–108.
- Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О.* Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 269 с.
- Рожков В.А.* Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими при мерами. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. 780 с.
- Cottier F., Tverberg V., Inall M., Svendsen H., Nilsen F., C. Griffiths.* Water mass modification in an Arctic fjord through cross-shelf exchange // J. Geoph. Res. 2005. Vol. 110. P. 348–364.
- Hanzlick D.* The West Spitsbergen Current: Transport, forcing and variability // Ph. D. Thesis. University of Washington (Seattle). 1993. 127 p.
- Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A., Isaksen K.* Long-term climate variations on Svalbard using early instrumental observations // Polar Research. 2014. Vol. 33, <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v33.21349>
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Makshtas A.P., Walsh D., A.V. Yulin.* Observationally based assessment of polar amplification of global warming // Geophys. Res. Lett. 2002. Vol. 29. P. 1878–1898.
- Polyakov I.V., Bekryaev R.V., Alekseev G. V., Bhatt U., Colony R., Johnson M., A.P. Makshtas.* Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875–2010 // J. of Climate. 2003. Vol. 16. P. 2067–2077.
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Timokhov L.A., Bhatt U., Colony R., Simmons H., Walsh D., Zakharov V.F.* Variability of the Intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the Last 100 Years // J. of Climate. 2004. Vol. 17. P. 4485–4497.
- Rudels B., Meyer R., Fahrbach E., Ivanov V.V., Østerhus S., Quadfasel D., Schauer U., Tverberg V., Woodgate R.* Water mass distribution in Fram Strait and over the Yermak Plateau in summer 1997 // Annales Geophysics. 2000. Vol. 18. P. 687–705.

D.I. TISLENKO, B.V. IVANOV

LONG-TERM VARIABILITY OF ATLANTIC WATERS TEMPERATURE IN THE FJORDS OF SPITSBERGEN IN CONDITIONS OF MODERN WARMING

In last decades, the climate of our planet is undergoing major changes. The most notable climatic changes observed in the Arctic region, which are called “Arctic amplification.” This is a decrease in the area of multi-years ice in 2007 and 2012, the temperature rises of intermediate Atlantic waters, increasing surface temperature. In this paper, an analysis of long-period variability of temperature transformed Atlantic waters (TAW) in the fjords of the West-Spitsbergen island (Isfjorden, Grønfjorden, Hornsund, Kongsfjorden and Bellsund) in the first period (1920–1940) and modern (1990–2010) warming in the Arctic. It is shown that the data corresponds to the periods of rise in temperature in the layer of the TAW and surface air temperature (SAT) for the area of the Svalbard.

Keywords: Arctic, Spitsbergen, climate variability, Atlantic waters.