

**АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА
В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ
В ХОЛОДНОМ ПОЛУГОДИИ И ПЕРСПЕКТИВА ИХ ИЗМЕНЕНИЙ
В БЛИЖАЙШЕЕ ПЯТИЛЕТИЕ**

А.Я. Коржиков¹, В.Я. Александров²

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

² Российский государственный гидрометеорологический университет, meteovik1@mail.ru

Представлены результаты исследования динамики изменения средних за холодные сезоны аномалий температуры воздуха в Западной Арктике в 1990—2018 гг. Показано, как проявляется тенденция глобального потепления в юго-западной части Карского моря. Определены основные синоптические процессы, которые формируют аномалии температуры воздуха разного знака в Карском море. Приводятся результаты расчета средних для холодных сезонов аномалий температуры воздуха до 2023 г. включительно. Показана тенденция к уменьшению значений положительных аномалий температуры воздуха на юго-западе Карского моря в холодных сезонах в ближайшее пятилетие.

Ключевые слова: аномалии температуры воздуха, Арктика, Карское море, элементарный синоптический процесс.

**ANOMALIES OF AIR TEMPERATURE
IN THE SOUTH-WESTERN PART OF THE KARA SEA
IN THE COLD HALF OF THE YEAR AND THE PROSPECTS
FOR THEM CHANGE IN THE NEXT FIVE YEARS**

A. Ya. Korzhikov¹, V. Ya. Alexandrov²

¹ Arctic and Antarctic Research Institute

² Russian State Hydrometeorological University

Air temperature anomalies observed during the cold period of the year play a significant role in the formation of the ice cover of the Arctic seas. Negative anomalies lead to the appearance of ice, exceeding the thickness of normal value and, conversely, during positive temperature anomalies the thickness of the ice usually does not reach the long-term average. The paper deals with the average seasonal anomalies of air temperature in the South -Western part of the Kara sea for the period from 1990 to 2018 for the cold half of the year (October — February). Air temperature anomalies in the South-Western part of the Kara Sea were considered against the background of temperature anomalies over the entire Western Arctic, surface pressure fields and high-altitude topography (H500).

Keywords: anomalies of air temperature, Arctic, Kara Sea, elementary synoptic process.

Введение

Навигация на западном участке трассы Северного морского пути осуществляется в круглогодичном режиме. Максимальные нагрузки морской флот испытывает в холодный период года, когда в результате преобладания отрицательной температуры воздуха акватория Карского моря, часть акватории Баренцева моря

и сибирские реки покрываются льдом. Исследование современных термических условий в холодном сезоне с целью дальнейшего их прогнозирования для этого периода года в Западной Арктике приобретает особую актуальность.

К настоящему времени опубликовано много исследований, посвященных потеплению в Арктике. Исследования, направленные на разработку методик сезонных прогнозов, идут по пути математического моделирования временных рядов [7].

Прогнозы температуры воздуха в Арктике с заблаговременностью до года составляются в ААНИИ. Используется макроциркуляционный метод прогнозирования, основанный на учете закономерностей макромасштабных преобразований атмосферной циркуляции над Северным полушарием [4]. Прогнозируются фоновые характеристики температуры воздуха. Основное внимание уделяется знаку аномалий температуры.

В настоящей работе сделана попытка исследовать динамику изменения аномалий температуры воздуха в юго-западной части Карского моря в холодный период года с целью получения статистических связей для прогнозирования их на несколько сезонов вперед.

В качестве исходного материала использован архив средних значений аномалий температуры воздуха, полей приземного давления и геопотенциала H500, рассчитанных для холодного сезона (октябрь — февраль) по Западной Арктике. Для этих целей использована база данных реанализа NCEP/NCAR. Аномалии температуры воздуха вычислялись от средних значений ряда за 1981—2010 гг.

Кроме того, для каждого холодного сезона подсчитано среднее число типовых групп атмосферных процессов. Данные по группам атмосферных процессов взяты из каталога, который постоянно в оперативном режиме пополняется в лаборатории долгосрочных метеорологических прогнозов ААНИИ.

Анализ аномалий температуры воздуха в холодный период года в Западной Арктике

В Западной Арктике выделим четыре района, аномалии температуры воздуха в которых относятся к предмету нашего исследования: Баренцево море (район 1), Карское море (район 2), Обь-Енисейский север (район 3) и западная часть приполюсной области (район 4) (рис. 1).

Распределение аномалий температуры воздуха по районам Западной Арктики в холодный период года за исследуемый ряд лет приводится в табл. 1.

На рис. 2 представлена повторяемость положительных аномалий температуры воздуха в различных районах Западной Арктики в холодные сезоны года с 1990 по 2018 г.

Из рис. 2, построенного на основе данных, приведенных в табл. 1, видно, что с 1990 по 1998 г. в холодный период года в Западной Арктике наблюдались преимущественно отрицательные аномалии температуры воздуха. Начиная с сезона 1999-2000 г. над всей Западной Арктикой преобладали положительные аномалии температуры воздуха, причем в западной части приполюсной области их

повторяемость составляла 100 %. Проявилась общая тенденция глобального потепления. Разделение исследуемого периода на два по знаку преобладающих аномалий температуры воздуха во многом связано с нормами, по которым вычислялись аномалии температуры (период вычисления нормы близок к периоду нашего исследования, а при наличии положительного тренда сначала идут отрицательные аномалии, которые потом переходят в положительные).

На рис. 3 показана межгодовая изменчивость средних сезонных аномалий температуры воздуха в юго-западной части Карского моря в холодный период года. Средние значения аномалий получены по данным полярных станций на острове Вайгач, острове Белый и на мысе Желания (см. рис. 1).

Таблица 1

Распределение знака аномалий температуры воздуха по районам Западной Арктики в октябре — марте 1990—2018 гг.

Холодный период	Район			
	1	2	3	4
1990-91	+	-	-	-
1991-92	-	-	-	-
1992-93	-	-	-	-
1993-94	-	-	-	-
1994-95	+	+	+	-
1995-96	-	-	+	-
1996-97	-	-	-	+
1997-98	-	-	-	+
1998-99	-	-	-	+
1999-00	+	+	+	+
2000-01	+	+	-	+
2001-02	+	+	+	+
2002-03	-	-	-	+
2003-04	-	-	-	+
2004-05	+	+	+	+
2005-06	+	+	+	+
2006-07	+	+	+	+
2007-08	+	+	+	+
2008-09	+	+	+	+
2009-10	+	+	-	+
2010-11	+	+	+	+
2011-12	+	+	+	+
2012-13	+	+	+	+
2013-14	+	+	+	+
2014-15	+	+	-	+
2015-16	+	+	+	+
2016-17	+	+	+	+
2017-18	+	+	-	+

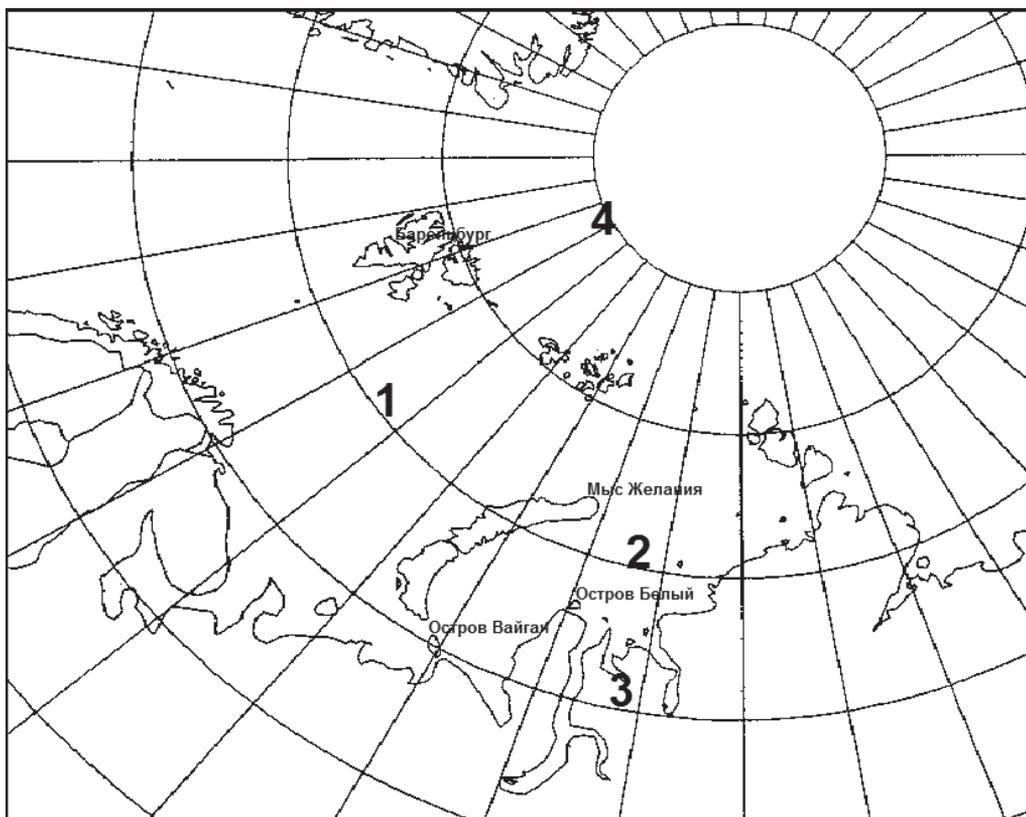


Рис 1. Карта Западной Арктики.

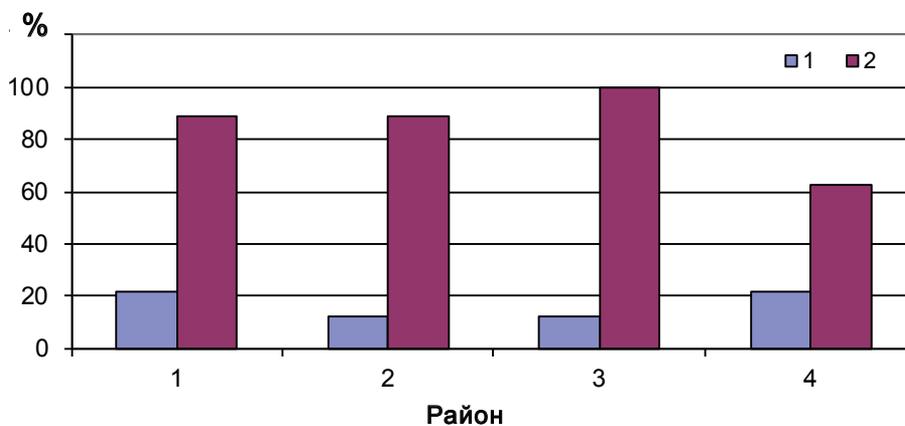


Рис. 2. Повторяемость положительных аномалий температуры воздуха в районах Западной Арктики в холодные сезоны в 1990—1998 гг. (1) и 1999—2018 гг. (2). Аномалии вычислены от средних значений температуры воздуха за период 1981—2010 гг.

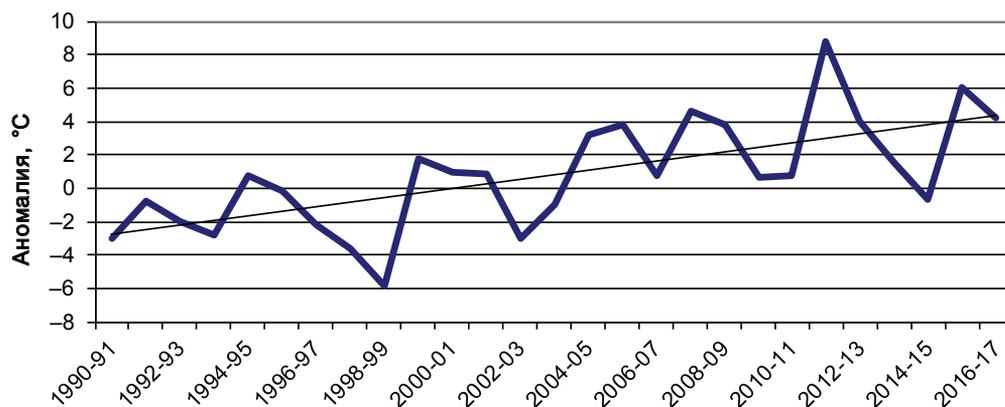


Рис. 3. Межгодовая изменчивость средних сезонных аномалий температуры воздуха (°C) в юго-западной части Карского моря в холодный период года (октябрь — февраль) за период с 1990 по 2018 г.

Из рис. 3 следует, что аномалия температуры воздуха на юго-западе Карского моря имеет *положительный* линейный тренд. Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,52$.

Кроме того, из рисунка видно, что начиная с сезона 1999-2000 г. в этом районе преобладают положительные аномалии температуры воздуха, что характерно для всей Западной Арктики в целом.

Аномалии температуры воздуха в юго-западной части Карского моря имеют положительную связь с аномалиями температуры в Обской губе. Корреляция с аномалиями на полярной станции Тамбей составляет 0,93. Связь с аномалиями на полярной станции Баренцбург несколько хуже (0,61), что обусловлено влиянием синоптических процессов над Канадским Арктическим архипелагом, Гренландским морем. Ошибка коэффициента корреляции δ_r для первого случая составляет 0,02, для второго 0,12. Для выборки ($n = 28$) полученные коэффициенты подтверждают существующую связь.

Эти корреляционные связи вполне объяснимы. Юго-запад Карского моря в холодный период года находится на оси климатической ложбины, направленной от атлантической депрессии в Арктику.

Анализ сезонных карт приземного давления позволил сделать вывод о том, что крупные положительные аномалии температуры воздуха в юго-западной части Карского моря возникают при формировании мощной ложбины атлантической депрессии, направленной в сторону приполюсной области, архипелага Северная Земля. Например, в сезон 2011-12 г., когда аномалия температуры в юго-западной части Карского моря достигала $+8,4$ °C (см. рис. 3), климатическая ложбина от Северо-Восточной Атлантики была направлена на Землю Франца-Иосифа и приполюсную область, что обусловило адвекцию теплых воздушных масс в Западную Арктику.

Наоборот, при формировании крупных отрицательных аномалий температуры воздуха ось ложбины атлантической депрессии менее развита и смещается к побережью Баренцева моря, на юг Новой Земли. Возможен также вариант локализации холодной воздушной массы в виде замкнутого циклонического вихря непосредственно над Баренцевым и Карским морями. Во всех этих случаях в исследуемый район поступают холодные воздушные массы из Арктического бассейна. Например, в сезон 2002-03 г., когда средняя аномалия температуры воздуха составляла $-2,4$ °С, над Баренцевым и Карским морями у поверхности Земли наблюдалась замкнутая циклоническая циркуляция, а на уровне 500 гПа над Карским морем находился центр высотного циклонического вихря.

Таким образом, знак и величина формирующихся аномалий температуры воздуха над акваторией юго-западной части Карского моря и над Западной Арктикой в целом существенно зависят от направления и интенсивности адвекции воздушных масс. Адвекцию воздушных масс во многом определяет поле приземного давления. Исследователи в России [3] и за рубежом [8] на основе анализа архивного аэросиноптического материала за много лет пришли к выводу о том, что над Арктическим бассейном наблюдается шесть основных групп синоптических процессов длительностью примерно семь дней, которые включают от одного до трех элементарных синоптических процесса (ЭСП) [3]. Впервые группы определены в ААНИИ и опубликованы в Атласе Арктики [1].

Анализ синоптических процессов в холодный период года

Исследование связи аномалий температуры воздуха в юго-западной части Карского моря с повторяемостью ЭСП групп барических полей показало, что максимальная корреляционная связь наблюдается с барическими полями ЭСП группы В ($r = 0,50$; $\delta_r = 0,14$), для которой характерно развитие циклонической деятельности над Западной Арктикой и вследствие этого формирование положительных аномалий температуры над этим регионом полярного бассейна [1, 3, 5].

Вторая по величине корреляционная связь наблюдается с ЭСП группы Б и имеет отрицательный знак ($r = -0,31$; $\delta_r = 0,17$). Синоптические процессы группы Б характеризуются развитием над Арктическим бассейном антициклона, который блокирует перемещение теплых атлантических воздушных масс на юго-запад Карского моря [3, 5].

На рис. 4 представлена повторяемость процессов групп Б и В в холодные сезоны 1990—2018 гг.

В уже упомянутом максимально теплом зимнем сезоне 2011-12 г. наблюдалось 22 элементарных синоптических процесса группы В, что и привело к адвекции большого количества теплого воздуха с Атлантики в Западную Арктику. При этом процессы группы Б, для которых характерно формирование обширного антициклона в Арктическом бассейне, отмечены только в двух ЭСП (рис. 4).

Связь между повторяемостью процессов групп Б и В в холодный период года небольшая ($r = -0,09$). Это обстоятельство позволяет использовать их в качестве независимых предикторов в регрессионной модели расчета аномалий температуры воздуха на юго-западе Карского моря.

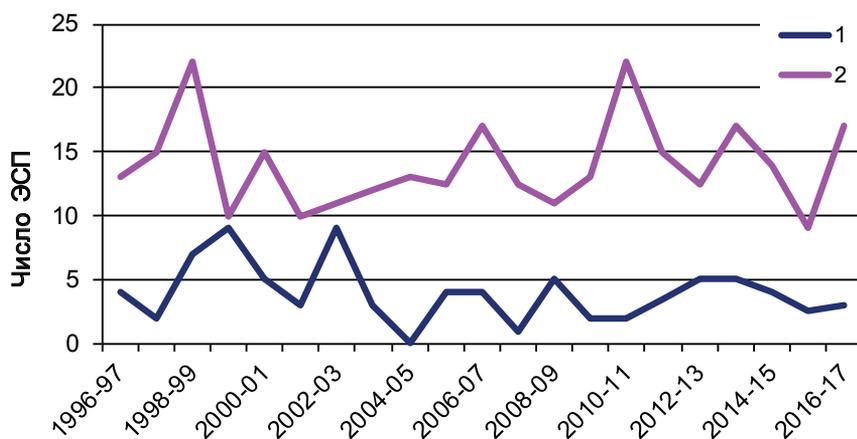


Рис. 4. Межгодовая изменчивость повторяемости процессов групп Б (1) и В (2) в холодный сезон года (октябрь — февраль) 1990—2018 гг.

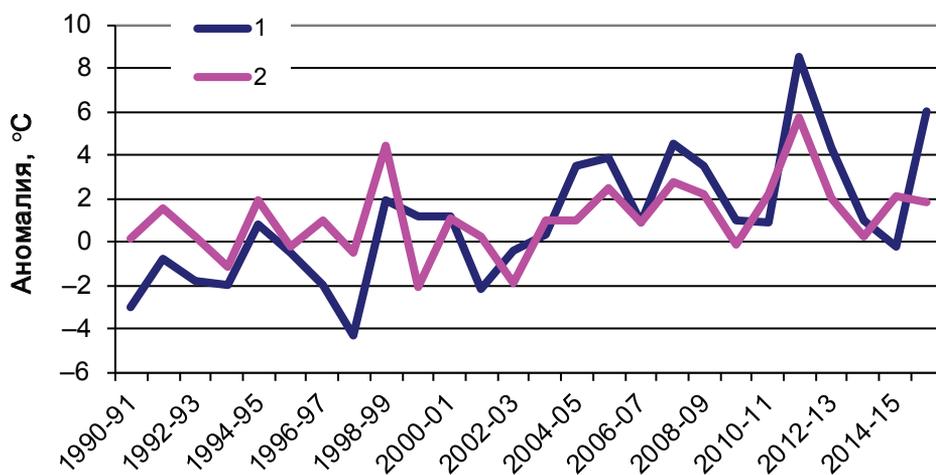


Рис. 5. Межгодовая изменчивость фактических значений аномалий температуры воздуха (1) и аномалий, рассчитанных по линейной регрессионной модели с независимыми параметрами Б и В (2).

На рис. 5 сопоставляются фактические значения аномалий температуры воздуха в юго-западной части Карского моря с аномалиями, рассчитанными по линейной регрессионной модели, где в качестве независимых переменных используются данные о повторяемости ЭСП групп синоптических процессов Б и В.

Уравнение множественной линейной регрессии для этих групп имеет следующий вид:

$$Y = 0,4x_1 - 0,4x_2 - 2,7, \tag{1}$$

где Y — средняя за октябрь — февраль аномалия температуры воздуха на юго-западе Карского моря ($\Delta T_{\text{БВ}}$); x_1 и x_2 — повторяемость синоптических процессов соответственно групп В и Б в октябре — феврале. Множественный коэффициент корреляции для этого уравнения $r = 0,56$, стандартная ошибка вычисления составляет 2,7. Доля совпадений фактических и расчетных значений ΔT по знаку составляет 0,68.

Таким образом, прогностические данные о повторяемости ЭСП групп Б и В можно использовать для оценки предстоящих изменений ΔT на юго-западе Карского моря в холодный период года.

Прогностические значения ΔT можно определить, используя модель, основанную на вычислении авторегрессии и скользящего среднего динамического ряда. Данный подход разработан Дж. Боксом и Г. Дженкинсом [3].

Авторами проведен расчет ΔT на пять шагов вперед — на пять холодных сезонов с 2018 по 2023 г. (рис. 6).

Результаты расчетов ΔT , представленные на рис. 6, показывают, что в ближайшее пятилетие в юго-западной части Карского моря в холодные сезоны будут сохраняться положительные аномалии температуры воздуха. Однако тренд их изменений сменится на отрицательный, что может привести в ближайшее пятилетие к постепенному усложнению ледовых условий в холодный период года не только в юго-западной части Карского моря, но и в Западной Арктике в целом.

На эту тенденцию указывают также изменения повторяемости синоптических процессов группы В (рис. 7). После максимально теплого зимнего сезона

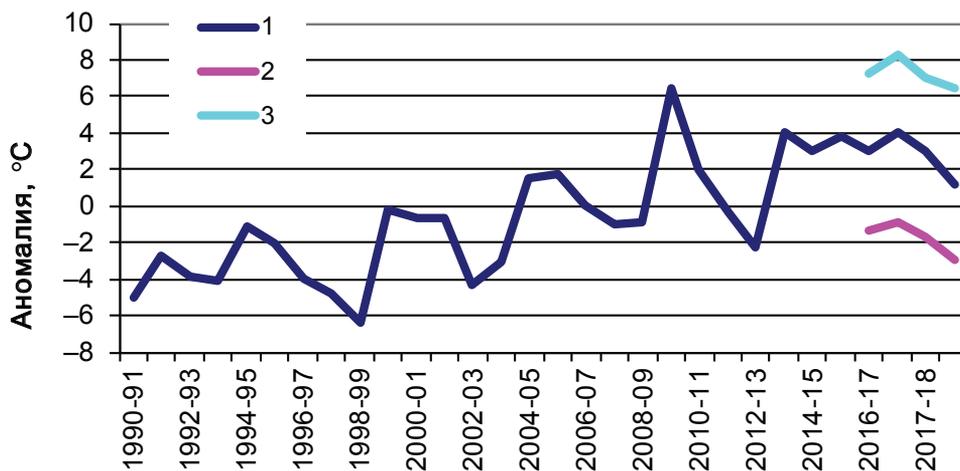


Рис. 6. Фактические и прогностические значения средних сезонных (октябрь — февраль) аномалий температуры воздуха ΔT в юго-западной части Карского моря на период до 2023 г.

1 — фактические (до 2018 г.) и прогностические (после 2018 г.) значения ΔT ;
2 и 3 — соответственно нижняя и верхняя границы 95 %-ного доверительного интервала.

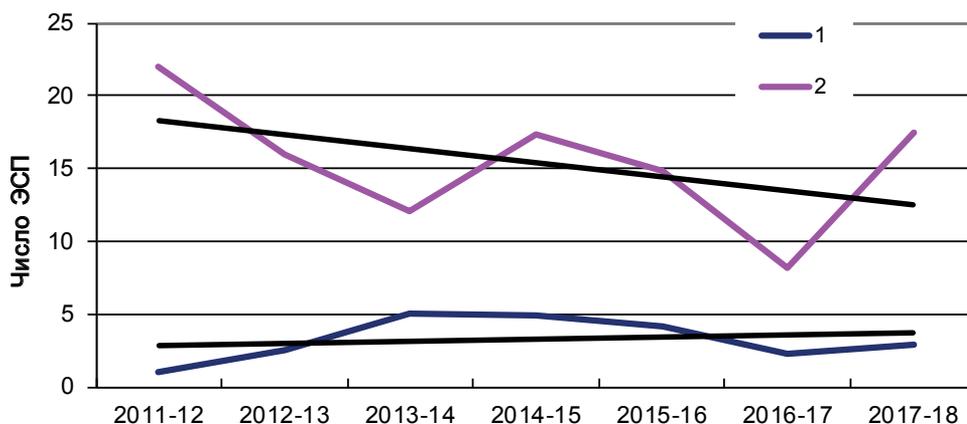


Рис. 7. Тенденции в изменении повторяемости синоптических процессов групп Б (1) и В (2) в холодные сезоны 2011—2018 гг.

2011-12 г., когда повторяемость группы В достигла 22 ЭСП за сезон, в последующий период возник отрицательный линейный тренд, который может стать предвестником уменьшения повторяемости ЭСП этой группы и, следовательно, сокращения адвекции теплых воздушных масс в Западную Арктику.

Заключение

Совместный анализ аномалий температуры воздуха и синоптических процессов в холодный период года в Западной Арктике позволил получить следующие результаты.

1. В исследуемом ряду лет (1990—2018 гг.) проявилась тенденция смены в холодные сезоны года преобладающих отрицательных аномалий температуры воздуха в Западной Арктике на положительные, что обусловлено общей тенденцией глобального потепления и отчасти средними значениями температуры воздуха (1981—2010 гг.), которые применялись для расчета аномалий.

В юго-западной части Карского моря в период с 1990 по 2018 г. выявлен положительный тренд в динамике формирования средних за холодные сезоны аномалий температуры воздуха. Показано, что аномалии температуры воздуха в этом районе достаточно тесно связаны с аномалиями температуры воздуха в других районах Западной Арктики.

2. Положительный тренд в динамике аномалий температуры воздуха в холодный период года в юго-западной части Карского моря связан с увеличением повторяемости элементарных синоптических процессов группы В, для которой характерно развитие циклонической деятельности над Баренцевым морем и Западной Арктикой в целом. При этом происходит адвекция теплых масс воздуха из приатлантического сектора Северного полушария в полярные широты. Отмечен также отрицательный тренд повторяемости процессов группы Б, для которой характерно формирование над Арктическим бассейном полярного антициклона,

блокирующего перенос теплых воздушных масс с Атлантики на акваторию Карского моря.

Показана возможность расчета средней сезонной аномалии температуры воздуха в юго-западной части Карского моря в холодный период года по синхронным данным о повторяемости синоптических процессов групп Б и В.

3. Результаты расчета величины ΔT на юго-западе Карского моря по модели, основанной на вычислении авторегрессии и скользящего среднего динамического ряда для пяти прогностических сезонов в холодный период года, показали, что положительные аномалии температуры воздуха будут сохраняться. Однако тренд их изменений сменится на отрицательный, что может привести в ближайшее пятилетие к постепенному усложнению ледовой обстановки не только в юго-западной части Карского моря, но и в Западной Арктике в целом.

На это также указывает тенденция к сокращению повторяемости синоптических процессов группы В и вследствие этого ослаблению адвекции теплых воздушных масс в Западную Арктику.

Список литературы

1. Атлас Арктики. М.: изд-во Главного управления геодезии и картографии при СМ СССР, 1985. 204 с.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1994. 408 с.
3. Гирс А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 488 с.
4. Дыдина Л.А. Особенности развития синоптических процессов в Арктике и их использование в прогнозах на средние сроки. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 224 с.
5. Ильющенко И.А., Коржиков А.Я., Александров В.Я. Характеристики полей приземного давления и аномалий температуры воздуха в Арктике в период глобального потепления // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 40. С. 142—149.
6. Шестаков Б.Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменений климата // Арктика и Север. 2016. № 24. С. 39—67.
7. Belleflamme A., Fettweis X., Erpicum M. Recent summer Arctic atmospheric circulation anomalies in historical perspective // Cryosphere. 2015, 9. P. 53—64.