

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-141-156>  
УДК 551.513



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## Некоторые закономерности формирования экстремальных приземных температур воздуха в районе архипелага Шпицберген в холодный период года

И.А. Ильющенко<sup>1\*</sup>, А.Я. Коржигов<sup>1</sup>, Б.В. Иванов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

\*ilyushenkova@aari.ru

### Резюме

В статье представлены результаты исследования метеорологических условий при формировании экстремальных приземных температур воздуха (ПТВ) в холодный период года с октября по май в районе поселка Баренцбург, арх. Шпицберген. В исследовании получены экстремальные значения ПТВ, проведена оценка связи экстремальной ПТВ в Баренцбурге с ПТВ в пунктах Лонгйир, Хорнсунн, Ис-фьорд Радио, Пирамида, Нью-Олесунн. Выделены и рассмотрены экстремально холодные и теплые периоды года с октября по май за ряд наблюдений с 1912 по 2022 г. Проанализированы особенности атмосферной циркуляции на приземном уровне, уровнях высот геопотенциальных поверхностей 500 гПа и 700 гПа, аномалии ПТВ, приводятся результаты сопоставления индексов атмосферной циркуляции NAO и AO при формировании экстремальных ПТВ. Полученные оценки макропроцессов могут применяться при составлении долгосрочных прогнозов по северной полярной области и детализации их по району Шпицбергена.

**Ключевые слова:** атмосферная циркуляция, Западная Арктика, синоптические процессы, температура воздуха, циркумполярный вихрь, Шпицберген.

**Для цитирования:** Ильющенко И.А., Коржигов А.Я., Иванов Б.В. Некоторые закономерности формирования экстремальных приземных температур воздуха в районе архипелага Шпицберген в холодный период года // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 2. С. 141–156. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-141-156>.

Поступила 20.03.2023

После переработки 16.05.2023

Принята 02.06.2023

## Some patterns of formation of extreme surface air temperature in the area of the Spitzbergen (Svalbard) archipelago during the cold period

Irina A. Ilyushchenkova<sup>1\*</sup>, Alexander Ya. Korzhikov<sup>1</sup>, Boris V. Ivanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> — Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

\*ilyushenkova@aari.ru

### Summary

The article presents research findings of meteorological conditions during the formation of extreme surface air temperature (SAT) in the cold period from October to May in the Barentsburg area, the Spitzbergen (Svalbard) archipelago. Six extremely cold periods and six extremely warm periods for the weather sequence from 1912 to 2022 are considered. Correlation coefficients of extreme SAT in Barentsburg with extreme SAT in the points of Longyearbyen, Hornsund, Isfjord Radio, Pyramiden, Nu-Alesund, located in the west of Spitzbergen (Svalbard), were calculated. Also, characteristics of atmospheric circulation at the surface level, the level of the geopotential surface 500 hPa and 700 hPa and air temperature anomalies are analyzed, the results of comparing atmospheric circulation indices NAO and AO in the formation of extreme SAT are presented. Characteristic localizations of the polar vortex were found during the formation of negative and positive anomalies of SAT. For cold periods with extremely low temperatures, the localization of the polar vortex in the northeast of the Kara Sea and Severnaya Zemlya archipelago is observed. At the surface level the baric trough from the Atlantic depression is shifted to the coast of Scandinavia and the southern part of the Barents Sea. The Svalbard region is under the influence of the periphery of the anticyclonic field over the Arctic basin, Greenland, over the western Arctic Seas, conditions are formed for the deviation of SAT by 3–4 degrees below normal. In the case of extremely high SAT, the polar vortex is shifted to the eastern part of the Canadian Arctic Archipelago and the Baffin Sea. At the surface level, the baric trough from the Icelandic depression develops over the Greenland, Norwegian and Barents Seas, which leads to the moving of warm air masses from the Atlantic to polar latitudes and the formation of average SAT in the Spitzbergen (Svalbard) region above long-term values by 1–2 degrees. The estimates of macroprocesses obtained can be used for preparing long-term forecasts for the northern polar region and detailing them for the Spitzbergen (Svalbard) region.

**Keywords:** air temperature, atmospheric circulation, polar vortex, Svalbard, synoptic processes, Western Arctic.

**For citation:** *Ilyushchenkova I.A., Korzhikov A.Ya., Ivanov B.V.* Some patterns of formation of extreme surface air temperature in the area of the Spitzbergen (Svalbard) archipelago during the cold period. *Arctic and Antarctic Research*. 2023, 69 (2): 141–156. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-141-156>.

Received 20.03.2023

Revised 16.05.2023

Accepted 02.06.2023

### ВВЕДЕНИЕ

Формирование температурного режима, в том числе и экстремальных значений, над районом арх. Шпицберген во многом зависит от характера атмосферной циркуляции.

Особенностью атмосферной циркуляции в районе Шпицбергена является нахождение вблизи климатического арктического фронта, протягивающегося от Исландии в район арх. Новая Земля, а также вблизи таких центров действия атмосферы, как Исландский минимум и Арктический максимум. Район исследования расположен на пути движения циклонов из района Исландии на северо-восток, в Западную Арктику. Кроме того, архипелаг расположен на границе трех западных арктических морей (Гренландского, северной части Норвежского и Баренцева). Западная и южная часть архипелага омываются теплыми водами Западно-Шпицбергенского течения, а восточные и северные части — холодными и распресненными водами, поступающими из центральной части Арктического бассейна и несущими дрейфующие льды [1]. Контрасты, которые возникают между температурой поверхности воды и приземной температурой воздуха (ПТВ), обуславливают активный циклогенез в течение почти всего года.

Исследования атмосферной циркуляции в Арктике и движения крупномасштабных воздушных масс имеют богатую историю. Важным вкладом в изучение

атмосферной циркуляции и прогнозирование метеорологических условий стали фундаментальные исследования Г.Я. Вангенгейма, А.А. Гирса, Х.П. Погосьяна [2–4]. Собственно климату Баренцевоморского региона посвящены исследования, выполненные в работах [5–7].

Более детально изучение температурного режима арх. Шпицберген и атмосферной циркуляции представлено в работе [8], в которой исследовано влияние атмосферной циркуляции на метеорологические условия на северо-западе Шпицбергена в период 2010–2013 гг. Анализ атмосферной циркуляции в районе арх. Шпицберген в период потепления 1920–1950 гг., отмечаемый как период первого потепления в Арктике, и «современный» период 1985–2015 гг., с использованием классификации Вангенгейма–Гирса, представлен в работе [9]. Формирование аномалий ПТВ в Арктике в холодный (с октября по май) и в теплый (с мая по октябрь) периоды года в зависимости от характера атмосферной циркуляцией над Арктикой описывается в работе [10]. Особенности атмосферной циркуляции в холодный (с ноября по апрель) и теплый (с мая по октябрь) периоды года рассмотрены в работе [11].

В исследовании [12] приводятся результаты изучения отдельно экстремально теплой зимы (с декабря по февраль) 2015/16 г., авторы работы отмечают рекордное потепление в Арктике, сосредоточенное в Баренцевом и Карском морях, юго-западной части Аляски и центральной части Северного Ледовитого океана. В работе [13] также рассматриваются экстремальные ПТВ в Арктике в январе и феврале 2016 г., изучается атмосферная циркуляция на высоте геопотенциальной поверхности 700 гПа и отмечается расщепление циркумполярного вихря на два основных центра. В исследовании [14] рассматриваются три причины формирования экстремальных температур воздуха над Арктикой, такие как: горизонтальный и вертикальный перенос, диабатические процессы и влияние атмосферной циркуляции.

В настоящем исследовании использовался наиболее длинный однородный ряд данных ПТВ для района арх. Шпицберген (более 75 % данных — это регулярные инструментальные наблюдения), что позволяет сделать заключение о том, что полученные результаты объективны и значимы. Рассматриваемый в данной работе временной интервал с 1912 по 2022 г. включает в себя периоды потеплений, отмечаемые как первый период потепления в Арктике и «современный», а также период понижения температуры в начале и середине XX в., что создает достоверную картину изменений ПТВ.

Целью исследования является анализ гидрометеорологических условий в районе арх. Шпицберген при формировании экстремальных ПТВ в холодные периоды, установление взаимосвязи между особенностями атмосферной циркуляции и формированием экстремальных ПТВ. Знания закономерностей и причин формирования экстремальных ПТВ могут применяться при составлении долгосрочных прогнозов по северной полярной области и детализации их по району Шпицбергена.

### **РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ, ДАННЫЕ И МЕТОД АНАЛИЗА**

В качестве района исследований был взят пункт Баренцбург, расположенный в заливе Грэн-фьорд на острове Западный Шпицберген. Для изучения метеорологических условий использовался композитный ряд данных (1912–2022 гг.),

созданный с привлечением данных соседних норвежских метеорологических станций и реанализа [15].

На основе этих данных и с привлечением реанализа NCEP/NCAR для приземного уровня и поверхностей 500 гПа и 700 гПа были построены синоптические карты среднемесячных значений ПТВ, рассчитаны новые климатические нормы за период 1991–2020 гг. [16] и аномалии ПТВ. Для выявления взаимосвязи среднемесячных значений ПТВ в Баренцбурге с другими пунктами (метеостанциями) арх. Шпицберген (Лонгйир, Хорнсунн, Ис-фьорд Радио, Пирамида, Нью-Олесунн) были рассчитаны соответствующие коэффициенты корреляции. Для указанных рядов данных получены стандартное отклонение ( $\sigma$ ), линейные тренды, экстремальные значения ПТВ, проведена проверка статистической значимости по критериям Колмогорова–Смирнова [17] и по  $t$ -критерию Стьюдента.

В работе использованы значения индексов NAO и AO, рассчитанные организацией Climate Prediction Center (NOAA) и доступные на сайте [18].

### АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Положительные средние месячные температуры воздуха в Баренцбурге наблюдаются только в июне–сентябре. В остальные месяцы преобладают отрицательные температуры воздуха. Период с октября по май относится к холодному периоду (ХП), в данном исследовании условимся называть этот период — зимой. На рис. 1 представлен ход многолетних средних месячных значений ПТВ в Баренцбурге.

Средняя ПТВ в Баренцбурге зимой претерпевает существенные изменения. На рис. 2 показан ход средней за зиму ПТВ с 1912 по 2022 г. Как видно из представленного рисунка, средние значения ПТВ в Баренцбурге в ХП года изменяются в пределах от  $-15$  до  $-4$  °С. При этом среднее значение ПТВ составляет  $-9,7$  °С. Хорошо выражен положительный линейный тренд в изменении средних значений ПТВ. Начиная с 1997 г. средние ПТВ зимой постоянно превышают ее нормальное (среднее за весь период) значение. При проведении оценки на нормальность распределения временного ряда значений ПТВ зимой по критерию Колмогорова–Смирнова

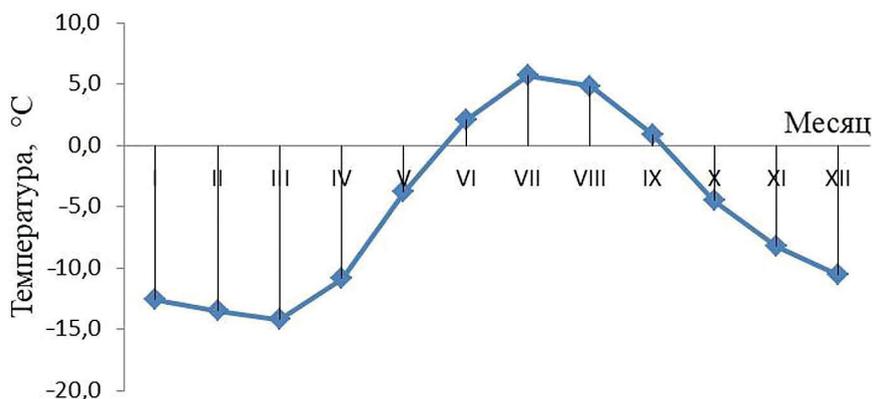


Рис. 1. Многолетние значения средних месячных ПТВ на станции Баренцбург с 1912 по 2022 г.

Fig. 1. Long-term values of average monthly SAT at Barentsburg station from 1912 to 2022

были получены значения вероятности  $p > 0,20$ , откуда следует, что эмпирическое распределение (в данном случае рядов средней месячной ПТВ) существенно не отличается от нормального распределения генеральной совокупности и последующие статистические процедуры, используемые в данном исследовании, позволяют объективно и обоснованно интерпретировать результаты.

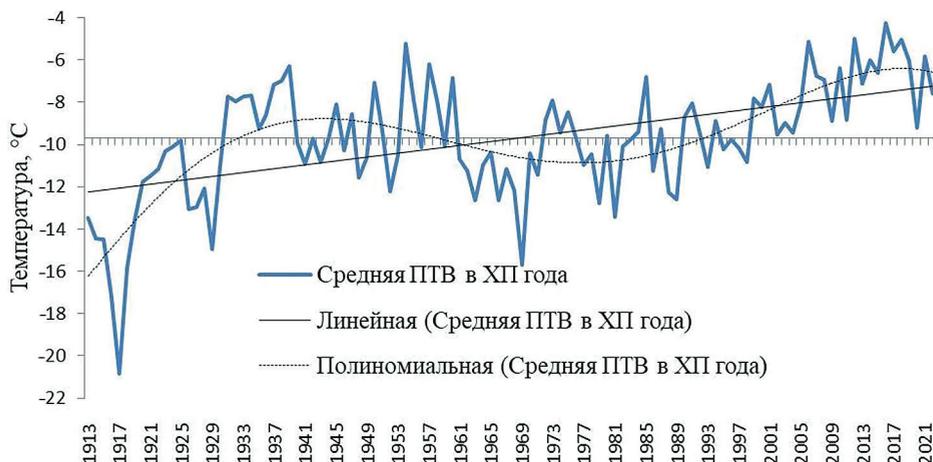


Рис. 2. Средняя ПТВ в Баренцбурге зимой с 1912 по 2022 г.

Fig. 2. Average SAT in Barentsburg during the winter from 1912 to 2022

Анализируя рис. 2, видим, что аппроксимация средних за холодный период температур воздуха в Баренцбурге полиномом 5-й степени с большой степенью достоверности ( $R^2 = 0,54$ ) воспроизводит ход средней зимней температуры воздуха, наблюдается мультидекадная изменчивость ПТВ, которая сопоставима с величиной долгопериодных изменений (тренда). В настоящее время мы прошли плато очередного повышения ПТВ. Следовательно, в ближайшие годы (2023–2040 гг.) следует ожидать постепенного понижения температуры воздуха в районе Шпицбергена.

Представляет интерес рассмотреть связь колебаний средних значений ПТВ в районе арх. Шпицберген с особенностями макросиноптических процессов над северной полярной областью. Если такая связь присутствует, то лучше всего она должна проявиться при формировании экстремально низких и экстремально высоких средних значений ПТВ в холодных периодах года.

При нормальном распределении все возможные отклонения попадают в интервал  $\pm 3$  стандартного отклонения. В данном исследовании за экстремальные ПТВ приняты те, которые отличаются от нормального значения на 1,5 стандартного отклонения и больше. Для исключения влияния естественной изменчивости и долгопериодных изменений климата временной ряд был разделен на климатические периоды 1912–1930 гг., 1931–1960 гг., 1961–1990 гг., 1991–2022 гг. Для каждого из периодов было рассчитано среднее значение ПТВ и стандартное отклонение, выделены экстремально холодные и теплые зимы. В табл. 1 приведены зимы с экстремально низкими и высокими средними температурами воздуха.

Зимы с экстремально низкими и высокими средними ПТВ в Баренцбурге

Table 1

Winters with extremely low and high average SAT in Barentsburg

Экстремально холодная зима, годы	Средняя температура воздуха за период, °C	Экстремально теплая зима, годы	Средняя температура воздуха за период, °C
1916/17	-20,8	1953/54	-5,2
1947/48	-11,6	1972/73	-7,9
1951/52	-12,2	1984/85	-6,8
1968/69	-15,7	2011/12	-5,0
1980/81	-13,4	2015/16	-4,3
1992/93	-11,1	2017/18	-5,0

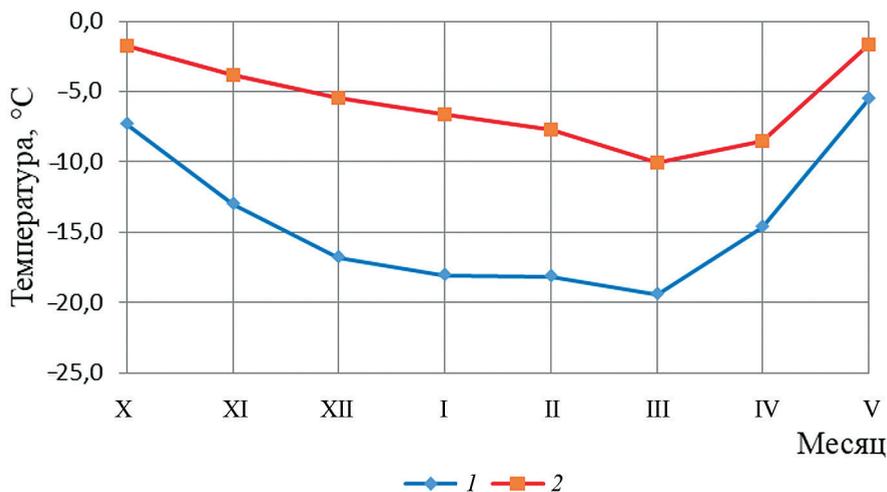


Рис. 3. Средние значения ПТВ по месяцам для экстремально холодных (1) и экстремально теплых зим (2) в Баренцбурге

Fig. 3. Average values of monthly SAT for extremely cold winters (1) and extremely warm winters (2) in Barentsburg

Если рассмотреть изменения средних температур по месяцам зимой, то можно увидеть, что максимальные различия значений наблюдаются в декабре–марте, а минимальные — в октябре и мае (рис. 3). Проверка по *t*-критерию Стьюдента показала, что во всех месяцах средние значения температуры воздуха при уровне значимости 0,05 существенно различаются для экстремально холодных и теплых зим.

Выводы по экстремальным температурам воздуха на Шпицбергене делаются на основе данных о температуре в Баренцбурге. Нами проведена проверка связи экстремальных ПТВ в Баренцбурге с данными наблюдений ПТВ на станциях Лонгйир, Хорнсунн, Ис-фьорд Радио, Пирамида, Нью-Олесунн, которые расположены на западе арх. Шпицберген. На карте (рис. 4) представлено расположение станций, для которых проводилось исследование корреляционной связи ПТВ.

Данные месячных ПТВ сравнивались по станциям в зависимости от длины временного ряда наблюдений: Баренцбург и Лонгйир — для всех экстремально холодных и теплых зим; Пирамида — экстремально холодные зимы 1951/52 г., 1968/69 г.,



Рис. 4. Расположение метеостанций на архипелаге Шпицберген, использованных в данной работе

Fig. 4. Location of Spitzbergen (Svalbard) archipelago weather stations used in this study

Таблица 2

**Прямоугольная матрица парных коэффициентов корреляции средних месячных ПТВ между Баренцбургом и станциями Лонгйир, Хорнсунн, Ис-фьорд Радио, Пирамида, Нью-Олесунн**

Table 2

**Rectangular matrix of paired correlation coefficients of average monthly SAT between Barentsburg and Longyearbyen, Hornsund, Iffjord Radio, Pyramiden, Ny-Alesund**

	Баренцбург	Лонгйир	Хорнсунн	Ис-фьорд Радио	Пирамида	Нью-Олесунн
Баренцбург	1,00000					
Лонгйир	0,98875	1,00000				
Хорнсунн	0,99348	0,99107	1,00000			
Ис-фьорд Радио	0,99359	0,98924	0,99092	1,00000		
Пирамида	0,99104	0,98637	0,98300	0,98717	1,00000	
Нью-Олесунн	0,98937	0,99115	0,98085	0,98223	0,98567	1,00000

1980/81 г., 1992/93 г. и все экстремально теплые зимы; Хорнсунн, Нью-Олесунн — экстремально холодные зимы 1947/48 г., 1951/52 г., 1968/69 г., 1980/81 г., 1992/93 г. и все экстремально теплые зимы; Ис-фьорд Радио — экстремально холодные зимы 1947/48 г., 1951/52 г., 1968/69 г., 1980/81 г., 1992/93 г. и экстремально теплые зимы 1953/54 г., 1972/73 г., 1984/85 г., 2011/12 г. В табл. 2 представлена прямоугольная матрица парных коэффициентов корреляции.

Из табл. 2 следует, что экстремальные значения ПТВ в Баренцбурге имеют высокую связь с аналогичными температурами в указанных пунктах Шпицбергена и, таким образом, значимо отражают общую картину для архипелага.

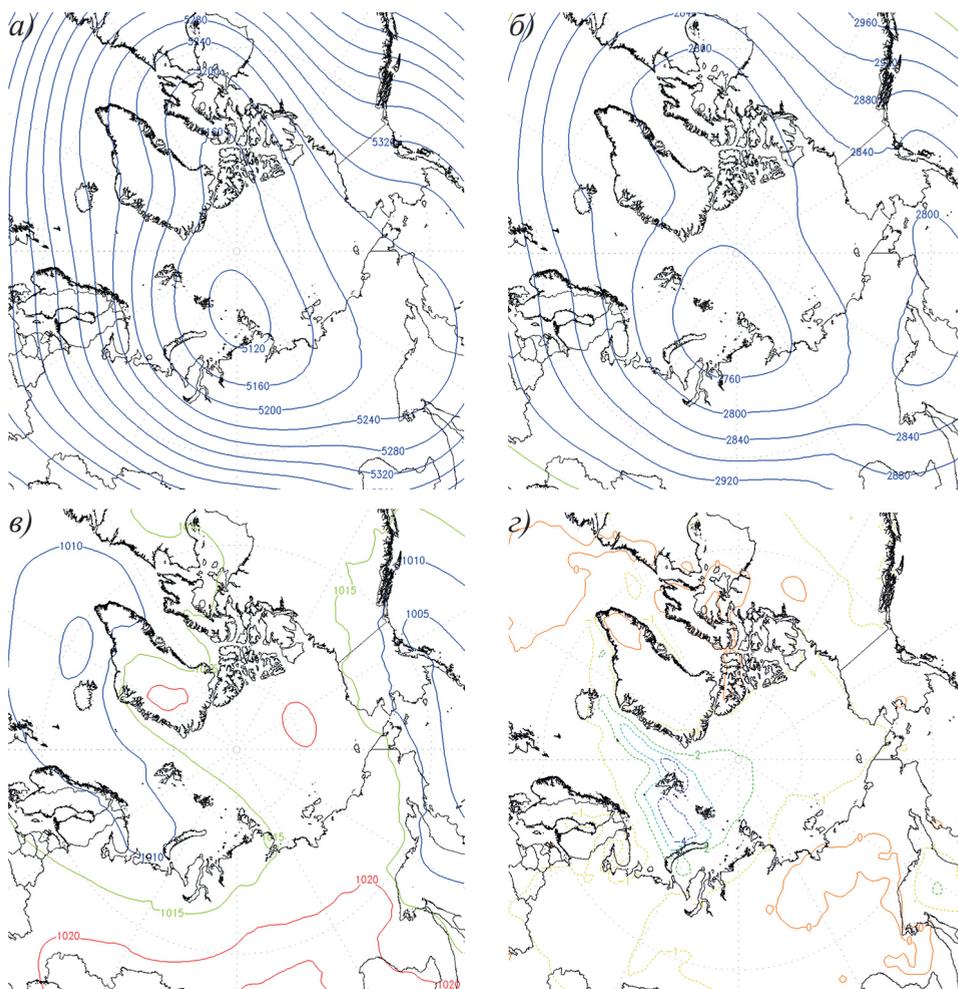


Рис. 5. Композитные карты для экстремально холодных зим, карта высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа, гп. м (а), карта высоты геопотенциальной поверхности 700 гПа, гп. м (б), карта поля давления на уровне моря, гПа (в), карта аномалий ПТВ, °С (г)

Fig. 5. Composite maps for extremely cold winters, 500 hPa geopotential height field, gpm (a), 700 hPa geopotential height field, gpm (b), sea level pressure field, hPa (c), surface air temperature anomalies, °C (d)

Рассмотрим теперь основные особенности барических полей, при которых формируются экстремальные температуры воздуха. Лучше всего особенности атмосферной циркуляции проявляются на высотах геопотенциальных поверхностей 500 гПа и 700 гПа, где образуются потоки, управляющие перемещением воздушных масс у поверхности земли, и, следовательно, определяют адвекцию холодного и теплого воздуха в нижнем слое тропосферы. В этой связи для всех холодных периодов рассмотрены средние месячные поля высот геопотенциальных поверхностей 500 гПа и 700 гПа, приземного давления и аномалий температуры воздуха. В статье на рис. 5(а, б, в, г) и 6(а, б, в, г) приводятся композитные карты для всех экстремально холодных и теплых зим.

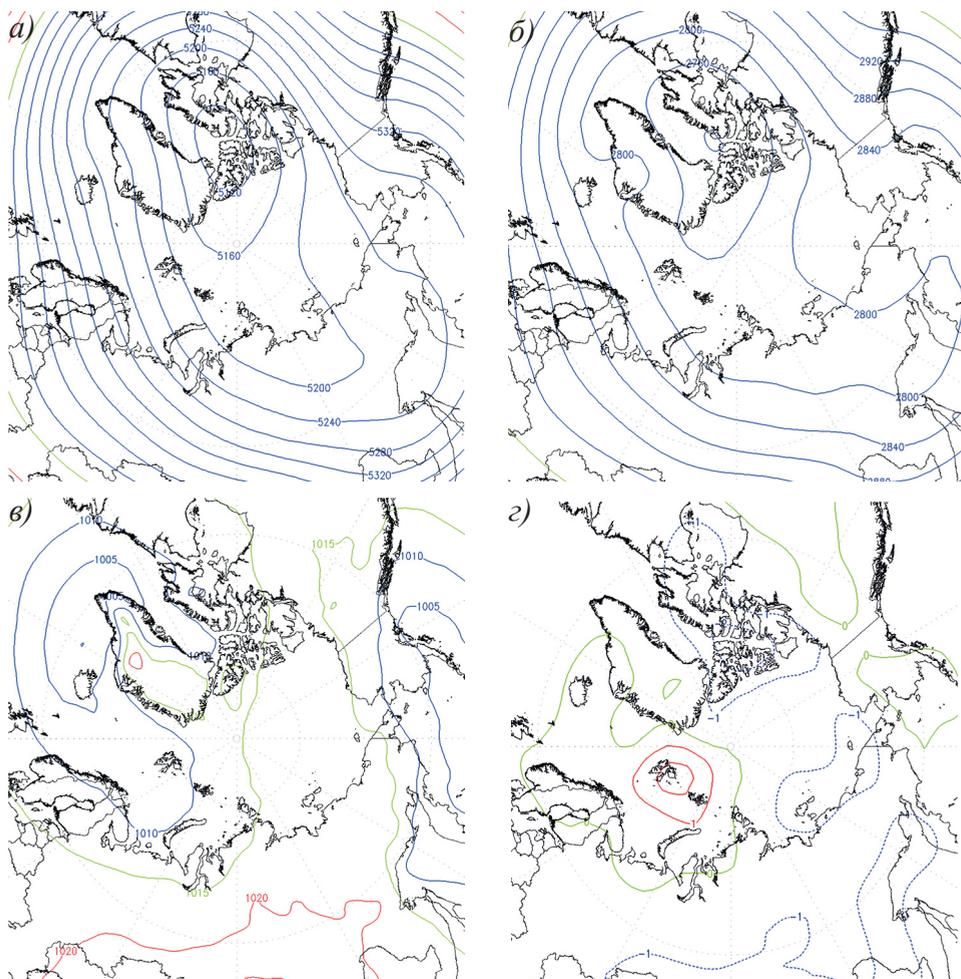


Рис. 6. Композитные карты для экстремально теплых зим, карта высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа, гп. м (а), карта высоты геопотенциальной поверхности 700 гПа, гп. м (б), карта приземного поля давления, гПа (в), карта аномалий ПТВ, °С (г)

Fig. 6. Composite maps for extremely warm winters, 500 hPa geopotential height field, gpm (a), 700 hPa geopotential height field, gpm (b), surface pressure field, hPa (c), surface air temperature anomalies, °C (d)

Анализ карт высот геопотенциальных поверхностей 500 гПа и 700 гПа показал (рис. 5а и 5б), что при экстремально холодных зимах высотный циклонический вихрь располагается над северо-востоком Карского моря и арх. Северная Земля. В этой связи в районе Шпицбергена в нижней тропосфере преобладает адвекция воздушных масс с северной части Гренландии. У поверхности земли при этом ложбина атлантической депрессии смещена к побережью Скандинавии, южной части Баренцева моря. Район Шпицбергена оказывается под воздействием периферии антициклонического поля над Арктическим бассейном, Гренландией (рис. 5в).

Складывающийся макросиноптический процесс приводит к формированию над западными арктическими морями (включая район Шпицбергена) средних температур воздуха на 3–4 градуса ниже нормальных значений (рис. 5).

В экстремально теплых зимах, как показывает анализ карт высот геопотенциальных поверхностей 500 гПа и 700 гПа (рис. 6а и 6б), высотный циклонический вихрь в нижней тропосфере смещен на восточную часть Канадского Арктического архипелага, море Баффина. Вдоль восточной периферии высотного циклонического вихря в район Шпицбергена поступают воздушные массы от Исландии, южных районов Гренландского моря. У поверхности земли ложбина от исландской депрессии развивается над Гренландским, Норвежским и Баренцевым морями, что свидетельствует о смещении траекторий атлантических циклонов к северу по сравнению с периодами экстремально холодных зим, что в свою очередь приводит к выносу теплых воздушных масс с Атлантики в полярные широты (рис. 6в). Последнее обстоятельство приводит к формированию в районе Шпицбергена, а также над всей Западной Арктикой средних температур воздуха выше средних многолетних на 1–2 градуса (рис. 6г).

Из анализа рис. 5, 6 видно, что при формировании экстремально низких и высоких температур воздуха зимой в районе Шпицбергена наблюдаются существенные различия в метеорологических полях нижней тропосферы.

Анализ рис. 5 и 6 с композитными картами высот геопотенциальных поверхностей 500 гПа, 700 гПа, приземного давления и аномалий ПТВ, рассчитанных для экстремально холодных и теплых зим, подтверждает вывод о существенности различий макросиноптических процессов при формировании экстремально низких и высоких ПТВ с октября по май в районе Шпицбергена.

В рамках исследования проведена оценка связи формирования экстремальных ПТВ зимой с индексами атмосферной циркуляции: североатлантическое колебание (NAO), арктическое колебание (АО). В связи с тем, что при положительных индексах NAO наблюдается вынос теплых воздушных масс из Атлантики в район Скандинавии и полярные широты [19], при формировании экстремально теплых зим в районе Шпицбергена должны чаще наблюдаться положительные индексы. При положительной фазе АО над Арктикой формируется более низкое давление [20], западно-восточный перенос сдвигается на север. При отрицательных фазах индексов NAO и АО зональный перенос нарушается и начинает преобладать меридиональная циркуляция.

Из табл. 3 следует, что в экстремально теплые зимы в большинстве месяцев (исключение май) повторяемость положительных индексов NAO составляет 67–83 %. Повторяемость положительных фаз индекса АО в экстремально теплые зимы составляет 50–83 %, за исключением января, где повторяемость положительных индексов АО падает до 17 %. Изучение повторяемости отрицательных фаз индексов NAO

## Повторяемость положительных индексов NAO и АО

Table 3

## Repeatability of positive NAO and AO indices

Повторяемость положительных индексов в экстремально теплых зимах, %		Повторяемость отрицательных индексов в экстремально холодных зимах, %		Месяц
NAO	АО	NAO	АО	
83	50	67	67	октябрь
83	50	67	67	ноябрь
83	83	50	67	декабрь
83	17	33	50	январь
83	33	50	67	февраль
67	83	50	50	март
83	50	33	33	апрель
17	50	67	83	май

и АО во время формирования экстремально теплых зим не показало статистически значимой связи, в среднем за зиму повторяемость отрицательного индекса NAO — 27 %, индекса АО — 48 %.

В экстремально холодные зимы увеличивается повторяемость отрицательных фаз NAO и АО. Наибольшая повторяемость отрицательных фаз индексов NAO отмечается в октябре, ноябре, мае и составляет 67 %, индексов АО — в октябре, ноябре, декабре, феврале, мае и составляет 67–83 %. Анализ повторяемости положительных фаз индекса NAO и АО во время экстремально холодных зим показал отсутствие статистически значимой связи, повторяемость в среднем за зиму составила для индекса NAO — 48 %, для индекса АО — 40 %.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В нашей работе основное внимание уделено анализу особенностей атмосферной циркуляции, которая играет важную роль в формировании экстремальных значений ПТВ. В результате изучения временного ряда ПТВ на примере ГМО «Баренцбург» нами были объективно выявлены экстремальные зимы и определены характерные типы циркуляции атмосферы, которые сопутствуют экстремально теплым и экстремально холодным зимам.

В работе [10] описан тип атмосферной циркуляции, при которой в районе арх. Шпицберген и к северу от него формируются положительные аномалии ПТВ, с максимальными значениями до 7–8 °С выше нормы. При такой локализации аномалий ПТВ на приземном уровне, согласно работе [10], отмечается усиление циклонической деятельности в районе Гренландского, Норвежского и Баренцева морей, что согласовывается с нашими результатами.

В работах [12–14] зимний сезон 2015/16 г. в Арктике выделен как экстремально теплый. По данным работы [13], положительная аномалия ПТВ в Арктике (выше 66° с. ш.) в 2016 г. отмечалась с января по май. В частности, к востоку арх. Шпицберген максимальные значения аномалий в январе и феврале были более чем на 6 °С выше нормы. В нашем исследовании получены сглаженные аномалии ПТВ в экстремально теплых зимах (для района арх. Шпицберген они составили

1–2 °C выше нормы), в связи с тем, что ПТВ рассматривается осредненная для всей зимы и за все выделенные экстремально теплые зимы. Положение основных очагов положительных аномалий ПТВ согласуется с вышеупомянутыми работами, а именно: над Западной Арктикой, включая район Шпицбергена, отмечается крупная положительная аномалия ПТВ. Основная роль в формировании положительных аномалий ПТВ в Западной Арктике в работах отдается атмосферной циркуляции [12, 13]. В работе [13] рассматриваются особенности атмосферной циркуляции в январе и феврале 2016 г., при которых полярный вихрь расщеплен на два центра, что становится причиной выноса теплых воздушных масс к северу от Баренцева моря. В работе [12] авторы продолжили исследование атмосферной циркуляции в сезон 2015/16 г., уделяя основное внимание аномальным высотам геопотенциальных поверхностей над Центральной Евразией. В нашей работе нет детализации атмосферной циркуляции по отдельным месяцам, главная задача заключалась в выявлении основных особенностей атмосферной циркуляции, объединяющих все экстремально холодные или теплые зимы.

В работе [21] за период 1900–2014 гг. в целом по Арктике (65–90° с. ш.) в зимний период выделены наибольшие отрицательная аномалия ПТВ в 1918 г. и положительная аномалия ПТВ в 2012 г. В нашей работе зима 2011/12 г. также отнесена к экстремально теплой. Сезон 1917/18 г. в районе арх. Шпицберген отличался температурами воздуха ниже нормы, но, делая поправку на влияние естественной межгодовой изменчивости, данный период в нашей работе мы не стали относить к экстремально холодным зимам. Авторы [21] также провели исследование взаимосвязи индексов NAO и АО с ПТВ в целом для Арктики и отдельно для района, включающего арх. Шпицберген. В соответствии с данным исследованием, наибольшая взаимосвязь для района арх. Шпицберген была найдена для периода 1940–1969 гг. Так, коэффициент корреляции составил 0,5–0,6, а в период потепления в последние десятилетия связь с этими индексами стала незначительной. В нашей работе статистически значимая связь с ПТВ найдена для экстремальных зим на протяжении всего периода исследования 1912–2022 гг., в зависимости от фазы индексов. Так, в экстремально теплые зимы наблюдается наибольшая повторяемость положительных фаз NAO и АО, для экстремально холодных зим — наибольшая повторяемость отрицательных фаз данных индексов. В нашей работе мы проанализировали повторяемость индексов NAO и АО, которые представляют собой первую моду изменчивости индексов атмосферной циркуляции. В дальнейшем мы планируем исследовать взаимосвязь с другими модами изменчивости атмосферной циркуляции в Арктике.

Авторы данной статьи попытались выявить региональные особенности атмосферной циркуляции, характерные для вышеуказанных периодов, и были сделаны следующие выводы:

1. В районе Шпицбергена холодные периоды года с октября по май с экстремальными температурами воздуха, отличающимися на 1,5 стандартного отклонения и больше, отмечались 12 раз за период наблюдений с 1912 по 2022 г.

2. Проверка по  $t$ -критерию Стьюдента показала, что во всех месяцах экстремально холодных и экстремально теплых зим средние температуры воздуха при уровне значимости 0,05 существенно различаются. При этом максимальные различия наблюдаются в декабре–марте, а минимальные — в октябре и мае.

3. Для холодных периодов года с октября по май с экстремально низкими ПТВ характерна локализация основного циркумполярного вихря над северо-востоком Карского моря и арх. Северная Земля. У поверхности земли при этом ложбина атлантической депрессии смещена к побережью Скандинавии, южной части Баренцева моря. Район Шпицбергена оказывается под воздействием периферии антициклонического поля над Арктическим бассейном, Гренландией. Последнее обстоятельство приводит к адвекции холодных воздушных масс от северной части Гренландии, как следствие, формированию в районе Шпицбергена и в Западной Арктике значительных отрицательных аномалий ПТВ.

4. В случае возникновения экстремально высоких температур воздуха, в период года с октября по май, циркумполярный вихрь смещен на восточную часть Канадского Арктического архипелага, море Баффина. Вдоль восточной периферии основного циклонического вихря в район Шпицбергена поступают воздушные массы от Исландии, южных районов Гренландского моря. При этом у поверхности земли ложбина от исландской депрессии развивается над Гренландским, Норвежским и Баренцевым морями, как следствие, теплые атлантические воздушные массы поступают в район Шпицбергена, где и формируют положительные аномалии ПТВ.

5. При формировании экстремально теплых зим повторяемость положительных индексов NAO составляет 67–83 %, индекса АО — 50–83 %. В экстремально холодные зимы увеличивается повторяемость отрицательных фаз NAO и АО. Наибольшая повторяемость отрицательных фаз индексов NAO отмечается в октябре, ноябре, мае и составляет 67 %, индексов АО — в октябре, ноябре, декабре, феврале, мае и составляет 67–83 %.

**Конфликт интересов.** У авторов исследования нет конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках проекта 5.1.4 Плана НИТР Росгидромета, 2020–2024 гг. «Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база Мыс Баранова”, Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген».

**Competing interest.** The authors have no conflict of interest to declare.

**Funding.** This study was made within the framework of Project 5.1.4, “Monitoring of State and Pollution of the Environment, Including the Cryosphere, in the Arctic Basin and in the Area of Scientific Station Ice Base Cape Baranov, Hydrometeorological Observatory of Tiksi and Russian Scientific Centre on Spitsbergen”, within the Plan NITR of Roshydromet 2020–2024.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л., Кулыгин В.В., Ящкая Н.А., Поважный В.В., Шевердяев И.В., Кумпан С.В., Третьякова И.А., Цыганкова А.Е. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Черное, Азовское и Каспийское море. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. 256 с.
2. Вангенгейм Г.Я. Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики // Труды ААНИИ. 1952. Т. 34. 314 с.
3. Гирс А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 488 с.

4. *Погосян Х.П.* Общая циркуляция атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 395 с.
5. *Turner J., Marshall G.J.* Climate change in the polar regions. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 434 p. doi: 10.1657/1938-4246-44.1.151b.
6. *Lemke P., Jacobi H.W.* Arctic climate change. The ACSYS decade and beyond. Dordrecht; New York: Springer, 2012. 464 p. doi: 10.1007/978-94-007-2027-5.
7. *Przybylak R.* The climate of the Arctic. Second edition. Cham: Springer, 2015. 287 p. doi: 10.1007/978-3-319-21696-6.
8. *Przybylak R., Arażny A., Ulandowska-Monarcha P.* The influence of atmospheric circulation on the spatial diversity of air temperature in the area of Forlandsundet (NW Spitsbergen) during 2010–2013 // International Journal of Climatology. 2018. № 38 (1). P. 230–251. doi: 10.1002/joc.5172.
9. *Священников П.Н., Прохорова У.В., Иванов Б.В.* Сравнение атмосферной циркуляции в районе архипелага Шпицберген во время потепления 1920–1950 гг. и в современный период // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 36–44.
10. *Ильющенкова И.А., Коржииков А.Я., Александров А.Я.* Характеристики полей приземного давления и аномалий температуры воздуха в Арктике в период глобального потепления // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 40. С. 142–149.
11. *Прохорова У.В., Священников П.Н., Иванов Б.В.* Исследование временной изменчивости характеристик атмосферной циркуляции в районе арх. Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4 (114). С. 47–56. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-4-47-56.
12. *Cullather R.I., Lim Y.-K., Boisvert L.N., Brucker L., Lee J.N., Nowicki S.M.J.* Analysis of the warmest Arctic winter, 2015–2016 // Geophysical Research Letters. 2016. № 43 (20). P. 10,808–10,816. doi: 10.1002/2016GL071228.
13. *Overland J.E., Wang M.* Recent extreme Arctic temperatures are due to a split polar vortex // Journal of Climate. 2016. № 29 (15). P. 5609–5616. doi: 10.1175/jcli-d-16-0320.1.
14. *Papritz L.* Arctic lower-tropospheric warm and cold extremes: Horizontal and vertical transport, diabatic processes, and linkage to synoptic circulation features // Journal of Climate. 2020. № 33 (3). P. 993–1016. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0638.1.
15. *Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д.* Восстановление ряда приземной температуры воздуха на российской станции в поселке «Баренцбург» (Шпицберген) // Российская Арктика. 2020. № 2 (8). С. 30–40. doi: 10.24411/2658-4255-2020-12093.
16. *Карандашева Т.К., Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д.* Изменения температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в XX–XXI вв. Обоснование введения новой климатической нормы // Российская Арктика. 2021 № 2 (13). С. 26–39. doi: 10.24412/2658-4255-2021-2-26-39.
17. *Дегтярев А.С., Драбенко В.А.* Статистические методы обработки метеорологической информации. СПб.: ООО «Андреевский издательский дом», 2015. 225 с.
18. North Atlantic Oscillation, Arctic Oscillation. National Centers for Environmental Prediction — Climate Prediction Center (NOAA). URL: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/> (дата обращения: 10.05.2023).
19. *Нестеров Е.С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. Москва: Триада, 2013. 127 с.
20. *Thompson D.W., Wallace J.M.* The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophysical Research Letters. 1998. № 25 (9). P. 1297–1300. doi: 10.1029/98gl00950
21. *Johannessen O.M., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Miles M.W.* Surface air temperature variability and trends in the Arctic: new amplification assessment and regionalization // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2016. № 68 (1). P. 28234. doi: 10.3402/tellusa.v68.28234.

## REFERENCES

1. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Makarevich P.R., Dzheniuk S.L., Kulygin V.V., Iaitskaia N.A., Povazhnyi V.V., Sheverdiaev I.V., Kumpan S.V., Tret'iakova I.A., Tsygankova A.E. Atlas klimaticheskikh izmenenii v bol'shikh morskikh ekosistemakh Severnogo polushariia (1878–2013). Region 1. Moria Vostochnoi Arktiki. Region 2. Chernoe, Azovskoe i Kaspiiskoe more. Atlas of Climatic Changes in Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1873–2013). Region 1. The Eastern Arctic Seas. Region 2. The Black Sea, the Sea of Azov, and the Caspian Sea. Rostov-on-Don: SSC RAS Publishers, 2014: 256 p. [In Russian].
2. Vangengeim G.Ia. Osnovy makrotsirkulatsionnogo metoda dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov dlia Arktiki. Fundamentals of the macrocirculatory method of long-term meteorological forecasts for the Arctic. Trudy AANII. 1952, 34: 314 p. [In Russian].
3. Girs A.A. Makrotsirkulatsionnyi metod dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov. Macrocirculatory method of long-term meteorological forecasts. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974: 488 p. [In Russian].
4. Pogosian Kh. P. Obshchaia tsirkulatsiia atmosfery. General circulation of the atmosphere. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972: 395 p. [In Russian].
5. Turner J., Marshall G.J. Climate change in the polar regions. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 434 p. doi: 10.1657/1938-4246-44.1.151b.
6. Lemke P., Jacoby H.W. Arctic climate change. The ACSYS decade and beyond. Dordrecht; New York: Springer, 2012: 464 p. doi: 10.1007/978-94-007-2027-5.
7. Przybylak R. The climate of the Arctic. Second edition. Cham: Springer, 2015: 287 p. doi: 10.1007/978-3-319-21696-6.
8. Przybylak R., Arazny A., Ulandowska-Monarcha P. The influence of atmospheric circulation on the spatial diversity of air temperature in the area of Forlandsundet (NW Spitsbergen) during 2010–2013. International Journal of Climatology. 2018, 38 (1): 230–251. doi: 10.1002/joc.5172.
9. Svyashchennikov P.N., Prokhorova U.V., Ivanov B.V. Comparison of atmospheric circulation in the area of Spitsbergen in 1920–1950 and in the modern warming period. Meteorologiya i gidrologiya. Meteorology and Hydrology. 2020, 45 (1): 36–44. [In Russian].
10. Il'yushchenkova I.A., Korzhikov A.Ia., Aleksandrov A.Ia. Features fields of surface pressure and air temperature anomalies in the Arctic in the period of global warming. Ucheniye zapiski RGGMU. Scientific notes of RSHU. 2015, 40: 142–149. [In Russian].
11. Prokhorova U.V., Sviashchennikov P.N., Ivanov B.V. Investigation of the temporary variability of the characteristics of atmospheric circulation in the area of Spitsbergen. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2017, 4 (114): 47–56. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-4-47-56. [In Russian].
12. Cullather R.I., Lim Y.-K., Boisvert L.N., Brucker L., Lee J.N., Nowicki S.M.J. Analysis of the warmest Arctic winter, 2015–2016. Geophysical Research Letters. 2016, 43 (20): 10,808–10,816. doi: 10.1002/2016GL071228.
13. Overland J.E., Wang M. Recent extreme Arctic temperatures are due to a split polar vortex. Journal of Climate. 2016, 29 (15): 5609–5616. doi: 10.1175/jcli-d-16-0320.1.
14. Papritz L. Arctic lower-tropospheric warm and cold extremes: Horizontal and vertical transport, diabatic processes, and linkage to synoptic circulation features. Journal of Climate. 2020, 33(3): 993–1016. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0638.1
15. Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D. Reconstruction of air temperature series at Russian station in Barentsburg (Svalbard). Rossiiskaia Arktika. Russian Arctic. 2020, 2 (8): 30–40. doi: 10.24411/2658-4255-2020-12093. [In Russian].
16. Karandasheva T.K., Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D. Air temperature changes in Barentsburg (Svalbard) in XX–XXI centuries. Justification for introducing a new climate standart. Rossiiskaia Arktika. Russian Arctic. 2021, 2 (13): 26–39. doi: 10.24412/2658-4255-2021-2-26-39. [In Russian].

17. Degtiarev A.S., Drabenko V.A. *Statisticheskie metody obrabotki meteorologicheskoi informatsii*. Statistical methods of processing meteorological information. St. Petersburg: ООО «Andreevskii izdatel'skii dom», 2015: 225 p. [In Russian].
18. North Atlantic Oscillation, Arctic Oscillation. National Centers for Environmental Prediction — Climate Prediction Center (NOAA). Available at: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/> (accessed 10.05.2023).
19. Nesterov E.S. *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean*. North Atlantic oscillation: atmosphere and ocean. Moscow: Triada, 2013: 127 p. [In Russian].
20. Thompson D.W., Wallace J.M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*. 1998, 25 (9): 1297–1300. doi: 10.1029/98gl00950.
21. Johannessen O.M., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Miles M.W. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: new amplification assessment and regionalisation. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2016, 68 (1): 28234. doi: 10.3402/tellusa.v68.28234.