

## МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-161-173>

УДК 551.513



### Некоторые механизмы формирования аномальной температуры воздуха в летние сезоны на арх. Шпицберген

И.А. Ильющенко<sup>1</sup>✉, А.Я. Коржииков<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

ИАИ, 0009-0006-9643-3063; АЯК, 0009-0004-2610-450X; БВИ, 0000-0002-6801-5458

**Аннотация.** Исследованы особенности формирования летних аномальных значений приземной температуры воздуха в районе арх. Шпицберген. В работе использован временной ряд среднемесячных величин приземной температуры воздуха в п. Баренцбург с 1912 по 2023 г. Выявлены значимые различия в характере атмосферной циркуляции, соответствующей аномально теплым и холодным летним сезонам, и рассчитаны корреляционные связи с индексами атмосферной циркуляции. Наибольшая статистически значимая связь аномалий приземной температуры воздуха наблюдается с индексом Арктический диполь, теснота связи в сентябре составила  $-0,49$ . Проведен спектральный анализ временных рядов индексов атмосферной циркуляции и определены основные периоды колебаний от 2–3 лет до 25 лет.

**Ключевые слова:** атмосферная циркуляция, Западная Арктика, приземная температура воздуха, современное потепление, циркумполярный вихрь, Шпицберген

**Для цитирования:** Ильющенко И.А., Коржииков А.Я., Иванов Б.В. Некоторые механизмы формирования аномальной температуры воздуха в летние сезоны на арх. Шпицберген. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024; 70(2): 161–173. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-161-173>

Поступила 24.03.2024

После переработки 05.06.2024

Принята 14.06.2024

## Some mechanisms of abnormal surface air temperature formation in the area of the Spitsbergen archipelago in summer

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

IAI, 0009-0006-9643-3063; AYK, 0009-0004-2610-450X; BVI, 0000-0002-6801-5458

**Abstract.** The temperature in the Arctic is increasing faster than the global average. A question that challenges scientific community is whether the intensity and frequency of dangerous meteorological phenomena in the Arctic are increasing as rapidly. The article presents the results of examining abnormal summer seasons in the area of the Spitsbergen archipelago. The study used data on surface air temperature in Barentsburg obtained from 1912 to 2023. The regional average results showed a statistically significant linear summer trend. The mean summer temperature in Barentsburg is increasing at a rate of 0.2 °C/10 years. Positive and negative extremes of seasonal mean temperature in the summer from June to September were determined as higher than or equal to 1.5 standard deviation. The atmospheric circulation at the sea level pressure and at the height of the geopotential surface of 500 hPa is analyzed, and the localization of surface temperatures anomalies for highlighted abnormal temperature in summer season events is discussed. The results of the analysis of atmospheric circulation revealed significant differences between abnormal warm and cold summer seasons. During abnormally cold summers the circumpolar vortex is located in the polar region and causes the advection of cold air masses from the north of Greenland. In the case of abnormally warm summers the cyclonic vortex is shifted to the Canadian Arctic archipelago and the Baffin Sea, while warm air masses from the Atlantic Ocean enter the area of the Spitsbergen archipelago. The assessment of the statistical significance of the correlation between the time series of surface air temperature anomalies and the atmospheric circulation indices Arctic Oscillation, Arctic dipole, Pacific North American oscillation showed significant results in September with the Arctic Oscillation index, in August and September with the Arctic dipole index, in July with the Pacific North American oscillation index. The greatest statistically significant association of surface air temperature anomalies was found with the Arctic dipole index, the closeness of the connection in September was  $-0.49$ . Spectral analysis was carried out and the main periods of atmospheric indices fluctuations from 2–3 years to 25 years were determined.

**Keywords:** air temperature, atmospheric circulation, polar vortex, recent warming, Spitsbergen, Western Arctic

**For citation:** Ilyushchenkova I.A., Korzhikov A.Ya., Ivanov B.V. Some mechanisms of abnormal surface air temperature formation in the area of the Spitsbergen archipelago in summer. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):161–173. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-161-173>

Received 24.03.2024

Revised 05.06.2024

Accepted 14.06.2024

### Введение

Повышение приземной температуры воздуха (ПТВ) в северной полярной области происходит более быстрыми темпами по сравнению с другими регионами [1], данное явление получило название — Арктическое усиление [2]. Это может усложнять процессы межширотного обмена и способствовать возникновению аномальных явлений в температурном режиме приземной атмосферы. В зимний период экстремальные отклонения величин ПТВ от многолетней нормы происходят с большей интенсивностью по сравнению с летним периодом [3, 4]. Экстремальным значениям ПТВ, наблюдаемым в зимний период, посвящено значительное количество исследований [5–8]. Однако также отмечается важность изучения изменений ПТВ в лет-

ний период [9], в связи с влиянием экстремальных значений ПТВ и особенностей атмосферной циркуляции, наблюдаемых в летний сезон, на ледовую обстановку в последующий осенне-зимний период [10].

В настоящем исследовании используются ряды данных, включающие среднемесячные значения ПТВ в районе архипелага Шпицберген за временной промежуток более 100 лет, описывающий особенности изменений ПТВ в период потепления начала двадцатого века и «современного» потепления в Арктике, что создает наиболее полное представление о региональных колебаниях ПТВ на арх. Шпицберген в XX и XXI в.

Исследуя долгопериодные колебания ПТВ, в том числе ее экстремальные значения, необходимо кратко охарактеризовать физико-географические особенности арх. Шпицберген. Район расположения арх. Шпицбергена является наиболее чувствительным к климатическим изменениям в Арктике и прилегающих районах Норвежского, Баренцева и Гренландского морей. Это связано с поступлением воздушных масс, формирующихся в различных климатических зонах. С юго-запада поступают в основном теплые и влажные воздушные массы из района Северной Атлантики. С севера поступает холодный и сухой воздух с приполюсного района. Район архипелага расположен к северу от среднего положения климатической границы двух воздушных масс: арктической холодной воздушной массы и более теплого воздуха умеренных широт. Изменения характеристик этих воздушных масс непосредственно отражаются на изменениях метеорологических параметров в районе арх. Шпицберген. Также следует отметить близкое расположение архипелага к климатическому арктическому фронту, простирающемуся от Исландии к арх. Новая Земля. В зоне влияния этого фронта наблюдается активная циклоническая деятельность. К юго-западу от Шпицбергена расположен важнейший центр действия атмосферы — исландский минимум (депрессия), где формируются циклоны, определяющие перенос теплых и влажных североатлантических воздушных масс в сторону архипелага. Также в непосредственной близости к архипелагу расположен еще один центр действия атмосферы — арктический максимум (антициклон). Под влиянием арктического максимума в район Шпицбергена могут поступать более холодные воздушные массы [11, 12].

Цель настоящей работы состоит в изучении особенностей атмосферной циркуляции при формировании аномально холодных и теплых летних сезонов на арх. Шпицберген, выявлении местоположений основных барических образований на приземном уровне и в верхней тропосфере, изучении формирующихся очагов аномалий ПТВ и выявлении взаимосвязи с индексами атмосферной циркуляции.

### **Район исследования и используемые данные**

Для изучения особенностей формирования аномальных летних сезонов на арх. Шпицберген выбран пункт Баренцбург, расположенный в заливе Грэн-фьорд на острове Западный Шпицберген. В исследовании использовали композитный ряд среднемесячных данных о ПТВ (1912–2023 гг.) [13]. На основе данных реанализа NCEP/NCAR, доступных на соответствующем сайте [14], построены средние для выделенных сезонов карты атмосферного давления на уровне моря и высоте стандартной изобарической поверхности 500 гПа. Для изучения пространственных аномалий ПТВ использовали данные наблюдений 175 метеорологических станций, собранные в Центре ледовой и гидрометеорологической информации (ЦЛГМИ)

Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). При построении карт аномалий ПТВ использовалась новая климатическая норма ВМО, соответствующая периоду 1991–2020 гг. [15]. В работе использованы данные первой, второй, третьей мод разложения по естественным ортогональным функциям полей давления на уровне моря от  $70^\circ$  с. ш. до Северного полюса с использованием реанализа ERA-5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [16]. Результаты расчетов предоставлены сотрудником отдела океанологии ААНИИ Н.А. Лис.

В исследовании применяли методы статистической обработки данных, спектральный анализ временных рядов. Получены оценки стандартных отклонений, линейного тренда, экстремальных значений ПТВ, проведена проверка статистической значимости полученных результатов по критериям Колмогорова–Смирнова и по  $t$ -критерию Стьюдента [17].

### Анализ и результаты

В первую очередь нами были проведены оценки на нормальность распределения имеющегося временного ряда ПТВ по критерию Колмогорова–Смирнова. Полученные значения вероятности, равные  $p > 0,05$ , свидетельствуют, что эмпирическое распределение существенно не отличается от нормального распределения генеральной совокупности, и последующие статистические процедуры (оценки трендов) позволяют объективно и обоснованно интерпретировать полученные результаты.

Для оценки аномальных повышений и понижений ПТВ в летний сезон были использованы ее средние значения за период июнь–сентябрь. Рис. 1 демонстрирует межгодовые колебания этих значений и характер трендов с 1912 по 2023 г. В первую очередь отмечается положительный линейный тренд со скоростью роста средней за летний сезон ПТВ, равной  $0,2^\circ\text{C}/10$  лет. Линейный тренд значим на уровне  $p = 0,05$ , что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

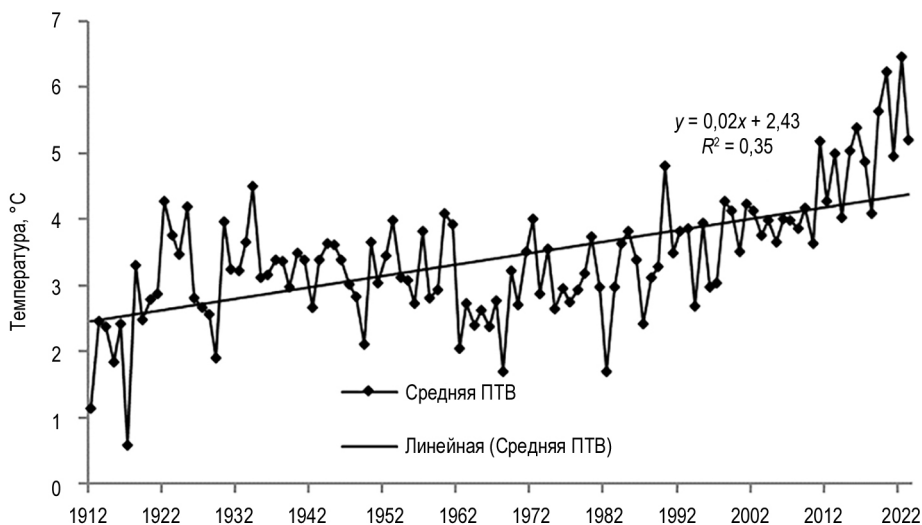


Рис. 1. Временные изменения летних значений ПТВ в Баренцбурге с 1912 по 2023 г.

Fig. 1. Variability of mean summertime SAT in Barentsburg from 1912 to 2023

### Аномально холодные и теплые летние сезоны

Для исключения влияния естественной изменчивости и долгопериодных изменений климата временной ряд был разделен на периоды 1912–1950 гг., 1951–1990 гг., 1991–2022 гг. Для каждого были рассчитаны среднее значение ПТВ и стандартное отклонение, выделены аномально холодные и теплые летние сезоны. Используемая в нашем исследовании выборка данных о ПТВ подчиняется закону нормального распределения, и все возможные отклонения попадают в интервал  $\pm 3$  стандартного отклонения. К экстремальным значениям ПТВ отнесены все значения в выборке, которые отличаются от нормального значения (в данном случае среднее многолетнее значение ПТВ для каждого из трех интервалов) на 1,5 стандартного отклонения и больше. В табл. 1 приведены летние сезоны с экстремально низкими и высокими средними значениями ПТВ. Аномально холодные летние сезоны отмечались до 1996 г., в последние три десятилетия не было зафиксировано экстремального отклонения летних величин ПТВ (превышающих 1,5 стандартного отклонения) в отрицательную область. Повторяемость аномально теплых летних сезонов возросла в последнее десятилетие.

Таблица 1

Летние сезоны с аномально низкими и высокими средними ПТВ в Баренцбурге

Table 1

#### Summers with abnormally low and high average SAT in Barentsburg

Аномально теплое лето, годы	Средняя температура воздуха, °С	Аномально холодное лето, годы	Средняя температура воздуха, °С
1922	+4,3	1912	+1,1
1934	+4,5	1917	+0,6
1960	+4,1	1962	+2,1
1990	+4,8	1968	+1,7
2019	+5,6	1982	+1,7
2020	+6,2	1994	+2,7
2022	+6,5	1996	+3,0

Проверка по t-критерию Стьюдента показала, что для всех месяцев средние значения ПТВ при уровне значимости 0,05 существенно различаются для аномально холодных и теплых летних периодов. Таким образом, вероятность ошибочно найти различия в целом за период и внутри каждого месяца составляет не более 5 %.

Поскольку выводы об экстремальных значениях ПТВ на Шпицбергене были сделаны нами на основании данных, имеющихся для пункта Баренцбург, мы оценили связь экстремальных значений ПТВ в Баренцбурге с данными наблюдений на станциях Лонгйир, Хорнсунд, Ис-фьорд Радио, Пирамида, Нью-Олесунн, которые также расположены на западе арх. Шпицберген. Нами были рассчитаны парные коэффициенты корреляции между указанными выше станциями. Для станций Хорнсунд, Пирамида, Нью-Олесунн использован доступный ряд наблюдений с 1947 по 2023 г. На станции Лонгйир доступны данные ПТВ с 1899 до 2023 г., для станции Ис-фьорд Радио использовался более короткий ряд с 1947 по 2014 г. Статистический анализ



показал очень высокую связь ПТВ в Баренцбурге с ПТВ на вышеуказанных станциях (коэффициенты корреляции  $r$  находятся в диапазоне 0,92–0,99 и статистически значимы на принятом для исследования уровне значимости 0,05).

### Условия формирования аномальных периодов в летний сезон

Отмечается на основании анализа карт геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа, что при формировании аномально холодных летних сезонов циркулярный вихрь расположен в приполюсном районе (рис. 2а) и вызывает адвекцию холодных воздушных масс от севера Гренландии к арх. Шпицберген. На приземном уровне в летние сезоны на композитных картах наблюдается достаточно размытое барическое поле в районе арх. Шпицберген, отмечается циклоническая активность в районе Северной Атлантики и в приполюсном районе (см. рис. 2б). В районе Шпицбергена наблюдаются значения ПТВ ниже средних многолетних на 1,5 °C (рис. 3а).

Рассмотрим основные особенности барических полей, при которых наблюдаются аномально теплые летние сезоны. Анализ карты геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа (см. рис. 2б) показал, что при формировании

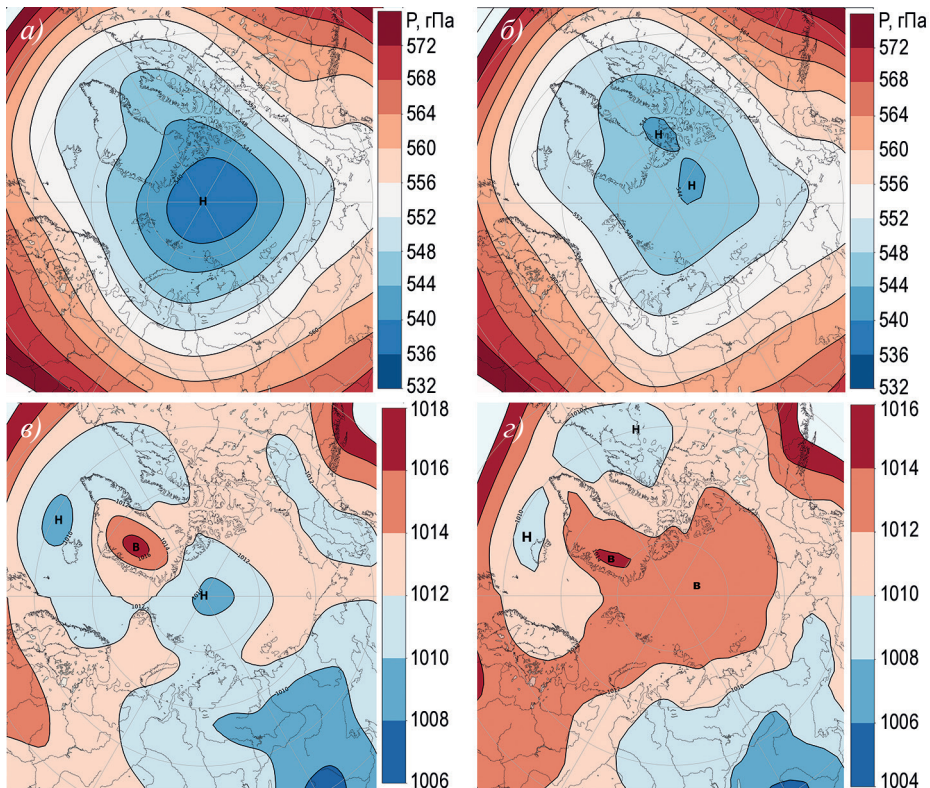


Рис. 2. Композитные карты геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа, гп. м и карты приземного поля давления, гПа, для аномально холодных (а и в соответственно) и аномально теплых (б и з соответственно) летних сезонов

Fig. 2. Composite maps for 500 hPa geopotential height field, gpm and sea level pressure field, hPa for abnormally cold summers (a and в, accordingly) and abnormally warm summers (б and з, accordingly)

аномально теплых летних сезонов циклонический вихрь смещен на Канадский Арктический архипелаг и в район моря Баффина. В районе арх. Шпицберген и Баренцева моря усиливается слабовыраженный барический гребень. При этом в район арх. Шпицберген поступают теплые воздушные массы с Атлантического океана.

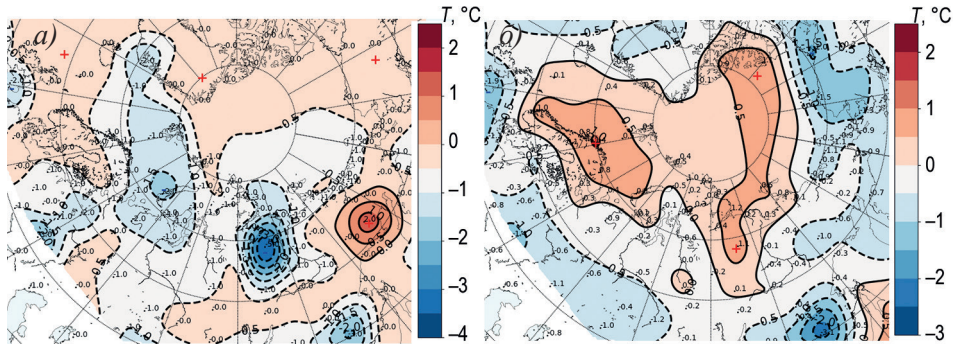


Рис. 3. Композитные карты аномалий ПТВ, °С, для аномально холодных (а) и аномально теплых (б) летних сезонов

Fig. 3. Composite maps for surface air temperature anomalies, °C for abnormally cold summers (a) and abnormally warm summers (b)

На приземном уровне формируется антициклональная область, простирающаяся от Баренцева моря и арх. Шпицберген до приполюсного сектора Восточно-Сибирского моря (см. рис. 2а). В районе арх. Шпицберген формируется положительная аномалия ПТВ на 0,5 °С выше средней климатической нормы (см. рис. 3б).

Для оценки связи формирования экстремальных значений ПТВ летом с индексами атмосферной циркуляции использованы данные разложения атмосферного давления на уровне моря от 70° с. ш. до полюса по естественным ортогональным функциям (Empirical Orthogonal Function, EOF). Рассмотрены атмосферные индексы, представляющие собой: первую моду разложения на естественные ортогональные функции (EOF1) — Арктическое колебание (Arctic Oscillation, AO); вторую моду разложения (EOF2) — Арктический диполь (Arctic Dipole, AD); третью моду (EOF3) — Тихоокеанско-Североамериканский индекс (Pacific North American oscillation, PNA).

Для анализа использованы среднемесячные данные ПТВ в июне, июле, августе и сентябре для каждого из выделенных экстремальных сезонов и среднемесячные данные индексов атмосферной циркуляции для соответствующих месяцев за период с 1949 по 2023 г.

В результате статистического анализа выявлено, что взаимосвязь экстремальных значений ПТВ с индексами атмосферной циркуляции различна в зависимости от месяца. В июне обнаружена очень слабая и статистически не значимая при уровне значимости 0,05 корреляционная связь с тремя рассматриваемыми индексами. Это указывает на то, что вероятность обнаружить летом ошибочную взаимосвязь между экстремальными значениями ПТВ и рассматриваемыми индексами атмосферной циркуляции составляет более 5 %. В дальнейшем исследовании указанный месяц нами не рассматривался.

В июле обнаружена слабая, но статистически значимая корреляционная связь с индексом PNA (коэффициент корреляции  $r = 0,27$ ). На следующем этапе для данного месяца рассмотрена повторяемость положительных и отрицательных фаз индекса

PNA при формировании аномально теплых и холодных летних сезонов. Ввиду обнаружения статистически значимой связи в июле с индексами АО и АД данные индексы в последующем нами также не рассматривались.

В августе отмечается слабая, но статистически значимая связь с индексом АД (коэффициент корреляции  $r = -0,27$ ). Для остальных рассматриваемых индексов выявлена очень слабая связь, и в дальнейшем они также не использовались.

В сентябре для всех индексов наблюдалось повышение коэффициента корреляции по модулю. Теснота связи экстремальных значений ПТВ с индексом АО составила величину 0,28, с индексом АД  $r = -0,49$ . С индексом PNA связь статистически не значима.

Повторяемость положительных и отрицательных фаз индексов атмосферной циркуляции для месяцев, в которые получены значимые результаты при оценке корреляционной связи, представлена в табл. 2 и 3.

При формировании аномально теплых летних сезонов в сентябре в 60 % случаев преобладает отрицательная фаза индекса АО, в 40 % случаев положительная. Анализ данных индекса АД показал, что при формировании аномально теплых сезонов преобладают положительные фазы индекса в августе и сентябре (80 % и 60 % соответственно). Повторяемость отрицательных фаз индекса PNA в июле составила 60 % в аномально теплые летние сезоны, и, соответственно, в 40 % случаев наблюдалась положительная фаза индекса PNA.

Таблица 2

**Повторяемость положительных фаз индексов АО, АД, PNA**

Table 2

**Repeatability of positive AO, AD, PNA indices**

Повторяемость положительных индексов для аномально теплых летних сезонов, %			Повторяемость положительных индексов для аномально холодных летних сезонов, %			Месяц
АО	АД	PNA	АО	АД	PNA	
–	–	40	–	–	40	июль
–	80	–	–	80	–	август
40	60	–	40	40	–	сентябрь

Таблица 3

**Повторяемость отрицательных фаз индексов АО, АД, PNA**

Table 3

**Repeatability of negative AO, AD, PNA indices**

Повторяемость отрицательных индексов для аномально теплых летних сезонов, %			Повторяемость отрицательных индексов для аномально холодных летних сезонов, %			Месяц
АО	АД	PNA	АО	АД	PNA	
–	–	60	–	–	60	июль
–	20	–	–	20	–	август
60	40	–	60	60	–	сентябрь



При рассмотрении anomalно холодных летних сезонов в сентябре отмечалась повторяемость отрицательных фаз индекса АО в 60 % случаев, соответственно в 40 % случаев наблюдалась положительная фаза данного индекса. Положительные фазы индекса AD в августе и сентябре отмечались в 80 % и 40 % соответственно. Отрицательные фазы индекса AD августа зафиксированы в 20 % случаев, в сентябре в 50 % случаев. В anomalно холодные летние сезоны в июне отмечалось преобладание отрицательных фаз индекса PNA (60 %), положительные фазы отмечены в 40 %.

Для изучения доминирующих периодов колебания индексов атмосферной циркуляции и временного ряда anomalий ПТВ был применен спектральный анализ. Используемое для спектрального анализа дискретных временных рядов одномерное преобразование Фурье позволяет выделить наиболее значимые периодичности. При данном анализе временные ряды индексов атмосферной циркуляции и anomalий ПТВ рассматриваются как упорядоченное множество случайных величин. Временные ряды индексов атмосферной циркуляции, по результатам теста Колмогорова–Смирнова, имеют нормальное распределение. Согласно общим свойствам преобразования Фурье, периодичности в рядах наблюдений в спектре проявляются в виде пиков на частоте, соответствующей периоду. Для спектрального анализа использован одинаковый временной ряд для индексов атмосферной циркуляции и anomalий ПТВ с 1949 по 2023 г. На рис. 4 представлен график спектральной плотности временных рядов anomalий ПТВ в летний сезон и индексов атмосферной циркуляции АО, AD, PNA.

Во время летнего сезона для индексов АО, AD и PNA отмечены наиболее значимые максимумы на частотах, соответствующих периодам 2–3 года, и низкочастотная изменчивость с периодами 5–6 лет и 15 лет. Для атмосферного индекса АО также характерен максимум, соответствующий периоду 7 лет, а также для ин-

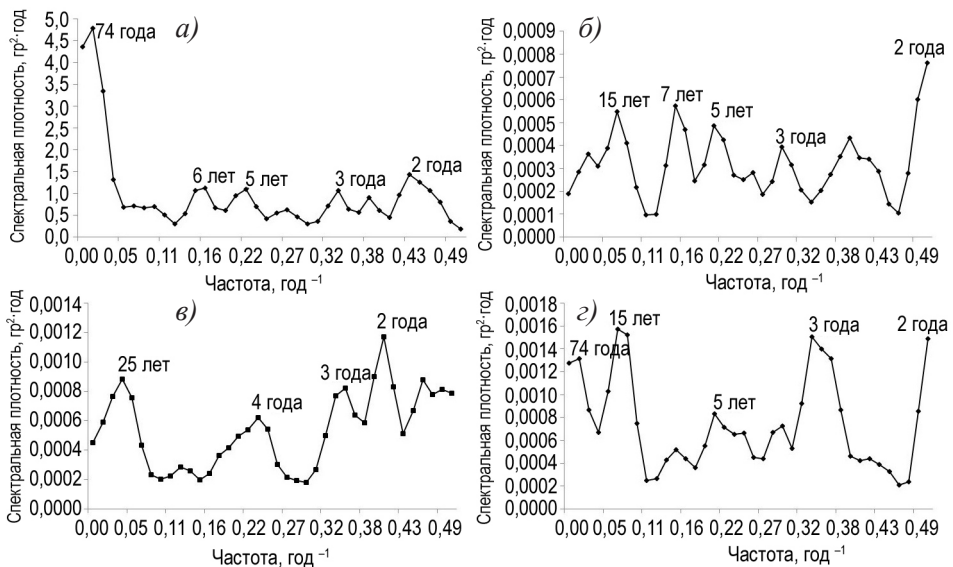


Рис. 4. Спектральная плотность временных рядов anomalий ПТВ (а) и индексов атмосферной циркуляции АО (б), AD (в), PNA (г)

Fig. 4. Spectral density of variability of mean summertime anomaly SAT (a) and atmospheric circulation indices AO (b), AD (v), PNA (z)

декса AD максимальные пики для 4-летнего и 25-летнего периодов. По результатам спектрального анализа аномалий ПТВ в летний сезон выделены периоды 2–3 года и 5–6 лет и максимальный пик, соответствующий используемому временному ряду для спектрального анализа, — 74 года.

### **Обсуждение полученных результатов**

В данном исследовании проанализированы ряды среднемесячных значений ПТВ в летний период (июнь–сентябрь) в п. Баренцбург с 1912 по 2023 г. и выделены аномально холодные и теплые летние сезоны. Для этих сезонов рассмотрены синоптические процессы на приземном уровне и в верхней тропосфере. При формировании аномально холодных и теплых летних сезонов выявлены различия в положении высотного циркумполярного вихря.

В летний период аномалии ПТВ в районе арх. Шпицберген в среднем за сезон составляют 0,5–1,5 °С, по сравнению с зимним периодом [18], когда величины аномалий достигают 2–4 °С, летом отклонения от нормы менее выражены. В летний период также наблюдаются аномальные сезоны, но со значительно меньшим отклонением от климатической нормы ПТВ. В работе [3] также отмечается более умеренное проявление периодов потепления и похолодания в Арктике по сравнению с зимним сезоном.

Скорость роста летней ПТВ в районе п. Баренцбург составила 0,2 °С/10 лет за период с 1912 по 2023 г. Для сравнения скорость роста ПТВ в Лонгйире в летний период (с июня по август) с 1976 по 2010 г. составила 0,5 °С/10 лет [19] и в зимний период (сентябрь–май) с 1975 по 2008 г. 1,65 °С/10 лет [20]. Для обоих пунктов в летний сезон скорость роста ПТВ значительно меньше, но также статистически значима.

Начиная с 1996 г. аномально холодные летние сезоны перестали отмечаться и увеличилась повторяемость аномально теплых летних сезонов, особенно в последнее десятилетие. Это согласуется с результатами, представленными в работе [9], в которой также отмечается сокращение числа аномально холодных летних дней и повышение числа аномально теплых летних дней в районах к северу от 60° с. ш. после 1994 г.

Результаты анализа композитных карт давления на уровне моря для аномально теплого периода согласуются с данными, полученными в нашей предшествующей работе [21], в которой рассматривались типы атмосферной циркуляции, наблюдающиеся в летний период, при которых формируются положительные аномалии ПТВ в районе арх. Шпицберген. Полученные нами результаты согласуются с выводами, сделанными в работе [22], в которой лето 1982 г. выделяется как одно из самых холодных на Шпицбергене, когда преобладала циклоническая циркуляция, обеспечивающая поступление воздушных масс с севера. В исследовании [23], выполненном для периода 2013–2017 гг., авторы выделяют самый холодный июль в 2014 г., а самый теплый — в 2016 г. В наших исследованиях данные годы как аномальные не выделяются. Очевидно, это связано с тем, что в результате осреднения значений ПТВ для всего летнего сезона (четыре месяца), данные годы не отмечены как аномально холодные или теплые.

Рассмотрена взаимосвязь индексов АО, AD, PNA и значений ПТВ для аномальных летних сезонов. Для июня статистически значимая корреляционная связь не найдена, в июле она обнаружена с индексом PNA, в августе с индексом AD, в сентябре с индексами АО и AD. В нашем исследовании наиболее высокая корреляционная связь экстремальных значений ПТВ обнаружена с индексом AD, которая в сентябре оценивается коэффициентом корреляции, равным –0,49. Это согласуется

с результатами, полученными в работе [9], где также обнаружен наибольший вклад индекса AD в тренды экстремальных значений ПТВ в летний сезон. Арктический диполь отражает меридиональный перенос воздушных масс, в зависимости от фазы индекса воздушные массы движутся в направлении от Берингова пролива к Гренландскому и Баренцеву морям и наоборот. В анализе атмосферной циркуляции при формировании аномальных сезонов преобладает меридиональная составляющая при переносе воздушных масс, в аномально теплых сезонах воздушные массы поступают с Северной Атлантики в район арх. Шпицберген, при формировании аномально холодных сезонов траектория воздушных масс проходит в обратном направлении: от севера Гренландии к архипелагу. Спектральный анализ временных рядов индексов циркуляции АО, AD, PNA и аномалий ПТВ в летний сезон позволил выделить наиболее значимые цикличности. Для индексов атмосферной циркуляции наиболее встречающиеся цикличности: квазидвухлетние (пики 2–3 года), квазিশестилетние (пики 5–6 лет), квазипятнадцатилетние (пики 15 лет). Для аномалий ПТВ характерны цикличности: квазидвухлетние (пики 2–3 года), квазিশестилетние (пики 5–6 лет). В межгодовой изменчивости рассматриваемых индексов атмосферной циркуляции и региональных аномалий ПТВ в летний сезон на арх. Шпицберген наиболее встречающиеся колебания приходятся на период 2–3 года и 5–6 лет. Однако в работе [24] период колебаний менее 3 лет отнесен к «погодному шуму».

### Выводы

1. При формировании аномально холодных и теплых летних сезонов в верхней тропосфере наблюдаются существенные различия в расположении циркумполярного вихря.
2. В случае аномально холодных летних сезонов циркумполярный вихрь расположен в приполюсном районе и вызывает адвекцию холодных воздушных масс от севера Гренландии к арх. Шпицберген. На приземном уровне отмечается циклоническая активность в районе Северной Атлантики и приполюсном районе, в районе Шпицбергена наблюдаются средние температуры воздуха ниже многолетних на 1,5 °С.
3. Для аномально теплых летних сезонов циклонический вихрь смещен на Канадский Арктический архипелаг и в район моря Баффина. В районе арх. Шпицберген и Баренцева моря усиливается барический гребень. Вдоль западной периферии арктического антициклона теплые воздушные массы с Атлантического океана поступают в район арх. Шпицберген. На приземном уровне над рассматриваемым районом формируется антициклональная область и положительные аномалии ПТВ, равные 1 °С относительно климатической нормы.
4. Для аномально холодных летних сезонов найдена статистически значимая связь июльских аномалий ПТВ с индексом PNA ( $r = 0,27$ ), аномалий в августе с индексом AD ( $r = -0,27$ ), в сентябре с индексами АО ( $r = 0,27$ ) и AD ( $r = -0,49$ ). Наибольшая статистически значимая связь аномалий ПТВ с индексом AD обнаружена в сентябре. По результатам спектрального анализа временных рядов индексов атмосферной циркуляции АО, AD, PNA и аномалий ПТВ выделены наиболее часто встречающиеся цикличности: квазидвухлетние (пики 2–3 года), квазিশестилетние (пики 5–6 лет).

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

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 24-27-00112 «Современные изменения арктического климата и экстремальные колебания погоды в западном секторе Северного морского пути».

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

**Funding.** This study was made within the framework of Russian Science Foundation grant 24-27-00112 “Current changes in the Arctic climate and extreme weather fluctuations in the western sector of the Northern Sea Route”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание; 2022. 124 с.
2. Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev, L.P. The Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020;13(3):3–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
3. Matthes H., Rinke A., Dethloff K. Recent changes in Arctic temperature extremes: warm and cold spells during winter and summer. *Environmental Research Letters*. 2015;10(11):114020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/114020>
4. 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. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0638.1>
5. 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):10808–10816. <https://doi.org/10.1002/2016GL071228>
6. Cassano J.J., Cassano E.N., Seefeldt M.W., Gutowski Jr W.J., Glisan J.M. Synoptic conditions during wintertime temperature extremes in Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016;121(7):3241–3262. <https://doi.org/10.1002/2015JD024404>
7. Graham R.M., Cohen L., Petty A.A., Boisvert L.N., Rinke A., Hudson S.R., Granskog M.A. Increasing frequency and duration of Arctic winter warming events. *Geophysical Research Letters*. 2017; 44(13):6974–6983. <https://doi.org/10.1002/2017GL073395>
8. Sui C., Zhang Z., Yu L., Li Y., Song M. Investigation of Arctic air temperature extremes at north of 60° N in winter. *Acta Oceanologica Sinica*. 2017;36:51–60. <https://doi.org/10.1007/s13131-017-1137-5>
9. Sui C.J., Yu L.J. Trends of summertime extreme temperatures in the Arctic. *Adv. Polar Sci*. 2018;29(3):205–214. <https://doi.org/10.13679/j.advps.2018.3.00205>
10. Serreze M.C., Stroeve J., Barrett A.P., Boisvert L.N. Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016;121(19):11463–11485. <https://doi.org/10.1002/2016JD025161>
11. Воробьев В.И. *Синоптическая метеорология*. Л.: Гидрометеоиздат; 1991. 616 с.
12. Угрюмов А.С., Лаврова И.В. *Основные закономерности общей циркуляции атмосферы: учебное пособие*. СПб.: РГГМУ; 2021. 72 с.
13. 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):30–40. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12093>  
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. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12093>
14. *Physical Sciences Laboratory*. URL: <https://downloads.psl.noaa.gov/Datasets/ncp.reanalysis.dailyavgs/surface/> (accessed 15.09.2023).
15. 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):26–39. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-2-26-39>

- 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. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-2-26-39>
16. *Climate Data Store*. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home/> (accessed 12.12.2023).
  17. Дегтярев А.С., Драбенко В.А. *Статистические методы обработки метеорологической информации*. СПб.: ООО «Андреевский издательский дом»; 2015. 225 с.
  18. Ильющенкова И.А., Коржиков 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;69(2):141–156. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-141-156>  
Pyushchenkova I.A., Korzhikov A.Ya., Ivanov B.V. Some patterns of formation of extreme surface air temperature in the area of the Svalbard archipelago during the cold period. *Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(2):141–156. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-141-156>.
  19. Bednorz E., Kolendowicz L. Summer mean daily air temperature extremes in Central Spitsbergen. *Theoretical and applied climatology*. 2013;113:471–479. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0798-4>
  20. Bednorz E. Occurrence of winter air temperature extremes in Central Spitsbergen. *Theoretical and Applied Climatology*. 2011;106:547–556. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0423-y>
  21. Ильющенкова И.А., Коржиков А.Я., Александров В.Я. Характеристики полей приземного давления и аномалий температуры воздуха в Арктике в период глобального потепления. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2015;40:142–149.  
Pyushchenkova I.A., Korzhikov A.Ya., Aleksandrov V.Ya. Features fields of surface pressure and air temperature anomalies in the Arctic in the period of global warming. *Ucheniye zapiski RGMU = Scientific notes of RSHU*. 2015;40:142–149. (In Russ.)
  22. Arażny A., Przybylak R., Kejna M. The Influence of Atmospheric Circulation on Mean and Extreme Weather Conditions on Kaffiøyra (NW Spitsbergen, Svalbard Archipelago) in the Summer Seasons 1975–2015. *Frontiers in Environmental Science*. 2022;10:867106. <https://doi.org/10.1002/joc.5172>
  23. Kejna M., Sobota I. Meteorological conditions on Kaffiøyra (NW Spitsbergen) in 2013–2017 and their connection with atmospheric circulation and sea ice extent. *Polish Polar Research*. 2019;40(3):175–204. <https://doi.org/10.24425/ppr.2019.129670>
  24. Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в районе Баренцева моря и их предсказуемость. *Метеорология и гидрология*. 2016;8:38–56.  
Aleksseev G.V., Glok N.I., Smirnov A.V., Vyazilova A.E. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016;41(8):544–558. <https://doi.org/10.3103/S1068373916080045>