

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-144-161>
УДК 551.583



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ЦИКЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ АРКТИЧЕСКИХ ВТОРЖЕНИЙ НА БЛИЖАЙШЕЕ ДЕСЯТИЛЕТИЕ

В.Ф. ЛОГИНОВ, С.А. ЛЫСЕНКО, Ю.А. БРОВКА, В.С. МИКУЦКИЙ*

Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**info@nature.nas.by*

Резюме

Исследованы пространственно-временные изменения продолжительности арктических вторжений (ПАВ) в различных секторах Северного полушария. В основу исследования положена классификация циркуляционных механизмов по Б.Л. Дзердзеевскому. Детальный анализ линейных трендов и циклических колебаний в изменении продолжительности арктических вторжений с использованием компонентно-гармонического метода позволил получить прогностические оценки ПАВ на ближайшее десятилетие.

Ключевые слова: арктическое вторжение, прогноз, тренды, циклы, циркуляционный механизм.

Для цитирования: *Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Бровка Ю.А., Микуцкий В.С.* Циклическая структура и предпосылки прогнозирования продолжительности арктических вторжений на ближайшее десятилетие // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 144–161. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-144-161>.

Поступила 12.03.2020

После переработки 25.05.2020

Принята 02.06.2020

CYCLICAL STRUCTURE AND THE PREREQUISITES FOR FORECASTING OF THE DURATION OF ARCTIC INVASIONS FOR THE NEXT DECADE

VLADIMIR F. LOGINOV, SERGEY A. LYSENKO, YULIYA A. BROVKA,
VLADIMIR S. MIKUTSKY*

Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**info@nature.nas.by*

Summary

The Duration of Arctic Invasions (DAI) is known to be connected with various climatological indexes. This paper presents the results of a study of DAI changes in various sectors of the Northern Hemisphere from 1899 to 2017. To this end, we used the classification of circulating mechanisms of the Northern Hemisphere by B.L. Dzerdzeevsky.

The basic attention was paid to the study of the trend component of the temporal variability of the duration of Arctic invasions; to the assessment of long-period cyclic fluctuations of the DAI; and to the forecasting the duration of Arctic invasions over the next decade in the Northern Hemisphere sectors.

To analyze the components of the change in the duration of Arctic invasions and its forecast, we used: a description of the initial data using a linear trend, approximation of time series by the Savitsky-Golay method, spectral analysis and spectral-time analysis, as well as the component-harmonic method.

We found a significant increase in the duration of Arctic invasions in the Pacific and Atlantic sectors and its significant decline in the European and American sectors. In deviations from the trend, a powerful quasi-fifty-year component for five sectors is clearly manifested; whereas in the European sector the deviation is rather weak and quasi-thirty-year fluctuations dominate here. What is more, quasi-20-year fluctuations in the variability of DAI were revealed, we predict DAI estimates for the next 10 years by combining the trend and two quasi-cyclic fluctuations. According to our forecast an increase in the duration of Arctic invasions will occur from 2022 in the European sector. In the Atlantic sector, DAI growth will begin in 2019 and continue until 2023, and then DAI will fall. In other sectors, there will be a decrease in the duration of Arctic invasions starting from 2016. The decrease in American sector starts only from 2022.

Keywords: arctic invasion, circulation mechanism, cycles, forecast, trends.

For Citation: Loginov V.F., Lysenko S.A., Brovka Yu.A., Mikutsky V.S. Cyclical structure and the prerequisites for forecasting of the duration of Arctic invasions for the next decade. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 144–161. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-144-161>.

Received 12.03.2020

Revised 25.05.2020

Accepted 02.06.2020

ВВЕДЕНИЕ

Арктическое вторжение — это адвекция массы арктического воздуха в средние широты. Оно сопровождается понижением температуры и влагосодержания. Поскольку арктический воздух более тяжелый, арктическое вторжение сопровождается ростом атмосферного давления. Большая повторяемость и продолжительность арктических вторжений приводит к формированию суровых зим в средних широтах. Нередко арктические вторжения достигают субтропических широт. Арктические вторжения происходят в тылу циклонов, развивающихся или регенерирующих на арктическом фронте. Они приводят к образованию малоподвижных барических гребней, соединяющих арктический циклон с субтропическим, и блокируют западный перенос воздушных масс.

Анализ изменений климата с применением типизации элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) по Б.Л. Дзердзеевскому был выполнен ранее в работах Н.К. Кононовой [1–2]. В работе [3] исследованы статистические связи изменений суммарной длительности продолжительных арктических вторжений в Атлантическом и Тихоокеанском секторе Северного полушария с вариациями климатических индексов процесса Эль-Ниньо–Южное колебание (ЭНЮК). Установлены значимые связи изменений индексов ЭНЮК в XX в. с суммарной длительностью арктических вторжений в Тихоокеанском секторе в феврале, для некоторых индексов эти связи максимальные при опережении на 2 месяца. Показано, что значимое влияние

межгодовых изменений индексов ЭНЮК на суммарную длительность арктических вторжений в Атлантическом секторе в ноябре и октябре сохраняется и в XXI в. при временных сдвигах между этими процессами до четырех месяцев.

На циркуляцию атмосферы в Северном полушарии, в том числе в умеренных широтах, оказывает влияние площадь морских льдов в арктических морях. Как показано в работе [4], в долговременных изменениях ледовитости морей Евразийской Арктики кроме линейного тренда (уменьшение ледовитости, особенно морей западного региона) выявлены 50–60-летний цикл и более короткие циклы продолжительностью около 20 и 10 лет. В XX в. вклад линейного тренда и долгопериодных циклов в общую дисперсию ледовитости арктических морей в августе оказался для западной группы морей в 2–2,5 раза большим, чем для восточной. Прогноз изменений площади льда в арктических морях в XXI в. показывает сохранение циклического характера колебаний ледовитости морей с максимумами в 2030-е и 2090-е годы. Можно предположить, что подобная циклическая структура присуща и временным изменениям продолжительности арктических вторжений.

В работе [5] представлены особенности влияния вариаций суммарной продолжительности арктических блокирующих антициклонов в Атлантическом, Европейском и Сибирском секторах Северного полушария на межгодовые изменения температуры поверхности почвы и морей европейской территории России в весенние месяцы. Выявлены районы со значимыми положительными и отрицательными связями поверхностных температур с суммарной продолжительностью арктических блокингов, опережающих их на 0–2 месяца. Показано, что в апреле и мае во многих районах европейской территории России происходит повышение поверхностных температур (что создает предпосылки для возникновения засухи) при увеличении, по сравнению с предыдущим годом, в феврале и в мае суммарной продолжительности арктических антициклонов в Атлантическом секторе, так же как и при увеличении суммарной продолжительности блокирующих процессов в Европейском секторе в апреле и ее уменьшении в марте.

Межгодовые изменения суммарной длительности продолжительных арктических вторжений в Атлантическом секторе при определенных условиях статистически значимо влияют на вариации месячных сумм атмосферных осадков, что показано на примере районов Крымского полуострова и прилегающих акваторий Черного и Азовского морей в работе [6]. Отмечено, что одной из причин увеличения засушливости весной и летом и роста интенсивности зимних и осенних осадков в Крыму являются соответствующие изменения суммарной длительности продолжительных арктических вторжений в Атлантический сектор. Установлена значимая положительная корреляция изменения суммарной длительности арктических вторжений в зимние месяцы с вариациями месячных сумм атмосферных осадков в Крыму, которые запаздывают по времени на 0–1 месяца. Корреляция межгодовых изменений месячных сумм осадков весной, летом и осенью с изменениями суммарной длительности арктических вторжений значимая отрицательная при сдвигах между этими процессами 1–2 месяца.

Методика выявления арктических вторжений по данным реанализа среднесуточных значений атмосферного давления NCEP/NCAR рассмотрена в работе [7]. На примере Азово-Черноморского региона показано, что применение предложенной методики выявления арктических вторжений позволяет получить оценки тенденций

изменения метеоусловий, практически совпадающие с их оценками по данным наблюдений на прибрежных метеостанциях, что дает возможность использовать эту методику в океанических регионах, где систематические наблюдения не проводятся.

Предметом нашего исследования являются изменения продолжительности арктических вторжений (ПАВ) в Атлантическом, Европейском, Сибирском, Дальневосточном, Тихоокеанском и Американском секторах за период с 1899 по 2017 г. В работе представлен детальный пространственно-временной анализ продолжительности арктических вторжений с целью разработки их сверхдолгосрочного прогнозирования в различных секторах Северного полушария.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использована типизация элементарных циркуляционных механизмов Северного полушария по классификации Б.Л. Дзердзеевского [8]. В последние десятилетия исследования школы Б.Л. Дзердзеевского продолжают представителем этой школы Н.К. Кононовой, которая успешно развивает и поддерживает разработанную более 70 лет тому назад классификацию атмосферных процессов в Северном полушарии [1, 2]. В качестве исходных данных, предоставленных Институтом географии РАН, нами использована продолжительность (суммарное годовое количество дней) различных ЭЦМ в Северном полушарии с 1899 по 2017 г. Для каждого сектора (название секторов и их положение приведены в таблице 1) выполнен расчет общей продолжительности арктических вторжений. Элементарные циркуляционные механизмы, при которых отмечаются арктические вторжения и формируются блокирующие процессы в секторах Северного полушария, приведены в табл. 1. ЭЦМ нарушения зональности (типы 3–7) характеризуются одним блокирующим процессом, ЭЦМ меридиональной северной циркуляции (типы 8–12) — двумя-четырьмя блокирующими процессами.

Для сглаживания временных рядов данных использовалась фильтрация методом Савицкого–Голея. В окрестности каждой точки строился аппроксимирующий полином 3-го порядка по методу наименьших квадратов. Окно сглаживания соответствовало примерно 15 % длины временного ряда.

Таблица 1

Блокирующие ЭЦМ для различных секторов Северного полушария [3]

Table 1

Blocking elementary circulating mechanisms for various sectors of the Northern Hemisphere [3]

Сектор	Блокирующие ЭЦМ
Атлантический (60° з.д. — 0°)	3, 8а, 8бл, 8гз, 8гл, 9а, 9б, 12а, 12бз, 12бл
Европейский (0° — 60° в.д.)	4а, 4б, 4в, 8бз, 10а, 10б, 12вз
Сибирский (60° — 120° в.д.)	5а, 5б, 5в, 5г, 8бз, 8бл, 8вз, 8вл, 8гз, 8гл, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12бл, 12вз, 12вл, 12г
Дальневосточный (120° — 170° в.д.)	5а, 5б, 5в, 5г, 8бз, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12вз, 12вл, 12г
Тихоокеанский (170° в.д. — 120° з.д.)	6, 8вз, 8вл, 9а, 12а, 12г
Американский (120° — 60° з.д.)	7аз, 7ал, 7бз, 7бл, 8а, 10а, 10б, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12бл, 12вз, 12вл, 12г

С целью получения дополнительных доказательств наличия квазипятидесятилетнего колебания в изменении ПАВ в различных секторах Северного полушария, а также других циклов меньшей продолжительности в период с 1899 по 2017 г. можно использовать другие методы и подходы к исследованию структуры временных рядов. Одним из таких методов является спектрально-временной анализ (СВАН) рядов наблюдений, который использовался при исследовании устойчивости циклов, то есть изменений временной структуры спектра ряда температуры [10] с построением соответствующих диаграмм. При построении последних функция амплитудного спектра процесса $A = A(\nu)$ подвергается временной развертке $A = A(t, \nu)$, где ν — частота, t — середина скользящего временного окна, для которого проводится спектральный анализ. Визуализация результатов СВАН возможна в виде графика поверхности функции A либо в виде контурной диаграммы этой же поверхности, цвета которой представляют интервалы значений. Последнее представление и носит название спектрально-временной диаграммы (СВАН-диаграммы). Ось Ox представляет середину скользящего окна, ось Oy — длину периода гармоник. Каждый столбец на таком графике представляет собой соответствующую периодограмму, т.е. амплитудный спектр Фурье с мощностями гармоник, рассчитанный в заданном скользящем временном окне. Стандартным «режимом» при расчете спектров временного ряда являются предварительные преобразования ряда путем вычитания среднего для устранения ложного пика на нулевой частоте, а также удаление тренда для исключения эффекта «ложной корреляции» и появления фиктивных периодичностей на низких частотах.

Спектральный анализ в скользящих окнах температурных рядов проводился с использованием возможностей Фурье-анализа временных рядов, предоставляемых системой STATISTICA (разработчик — компания TIBCO [11]). При наличии большого числа рядов температуры, а также с учетом того, что при длине ряда в 118 лет (1899–2017 гг.) и длине скользящего окна в 48 лет необходимо провести такой анализ многократно, очевидна необходимость автоматизации данной процедуры. Для этих целей на основе открытой COM архитектуры системы STATISTICA была разработана специализированная VBA-программа.

В работе использован многолетний ряд ПАВ длительностью 118 лет. Длина скользящего окна выбиралась в диапазоне 42–52 года и составляла менее 50 % от длины использованного ряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Следует отметить, что из-за ограниченного числа наземных станций и низкой плотности радиозондовых наблюдений в начале периода с 1899 по 2017 г. нельзя говорить об однородности данных по изменению циркуляционных процессов по Б.Л. Дзердзеевскому, по крайней мере в первой части ряда. И только в послевоенное время, в конце 40-х годов прошлого столетия плотность метеорологической сети на территории земного шара превысила 50 % от максимального числа станций, достигнутого к началу 1990-х годов, что, естественно, уменьшило эту неопределенность в изменении циркуляционных процессов. Принимая во внимание это обстоятельство, кроме анализа всего доступного ряда, отдельно более детально нами выполнен анализ ПАВ за последний период с 1948 по 2017 г., для которого выделение ЭЦМ основано на данных, полученных на достаточно плотной метеорологической сети (порядка

70 % от максимума числа станций). Однако и для этого 70-летнего периода плотность сети в таких секторах, как Тихоокеанский и Атлантический, оставалась небольшой.

На основе рабочей базы данных был выполнен статистический анализ общей продолжительности арктических вторжений. Как показали результаты вычисления линейных трендов (табл. 2) для периода 1899–1948 гг., в пяти из шести секторов наблюдается падение ПАВ, и только в Европейском секторе — слабый рост ПАВ. Для 70-летнего ряда (1948–2017 гг.) наблюдаются восходящие линейные тренды продолжительности арктических вторжений для четырех секторов: Тихоокеанского, Атлантического, Дальневосточного и Сибирского. Наиболее существенный рост ПАВ отмечается в Тихоокеанском и Атлантическом секторах. В Европейском секторе наблюдается падение ПАВ со скоростью, близкой к скорости роста ПАВ в Атлантическом секторе. Только для трех секторов отмечаются статистически значимые величины падения (Европейский сектор) и роста (Тихоокеанский и Атлантический секторы) ПАВ как за весь исследуемый период, так и за последние 70 лет. Следует отметить незначительно изменяющуюся скорость падения ПАВ на протяжении 118-летнего периода и отдельных его периодов в Американском секторе.

Различие знаков трендов ПАВ двух пар секторов (Европейский и Американский, Тихоокеанский и Атлантический) за последние 70 лет можно соотнести с их географическим разнесением на 180° : первая пара расположена на западной части Евразийского и Американского континентов, а вторая — локализована в акватории Тихого и Атлантического океанов. Одинаковый знак коэффициентов линейного тренда для каждой пары секторов можно объяснить расположением указанных четырех секторов относительно центров основных круглогодичных центров действия атмосферы (ЦДА) — Исландского и Алеутского. Синхронность изменений ПАВ на восточной и западной сторонах Исландского и Алеутского минимумов свидетельствует о синхронности изменений всех либо части морфометрических характеристик (широты, долготы, интенсивности) указанных ЦДА в их квазивековом изменении.

Результаты проведенного сравнительного анализа коэффициентов детерминации (R^2) линейных трендов ПАВ в различных секторах Северного полушария показали, что только в Тихоокеанском и Европейском секторах величина детерминации составляет 0,41–0,48 за весь исследуемый период и последние 70 лет, т.е. линейный

Таблица 2

**Коэффициенты линейных трендов ПАВ (α) и детерминаций (R^2)
для разных секторов и периодов времени**

Table 2

**Coefficients of linear trends of Arctic invasion duration (α) and determinations (R^2)
for different sectors and time periods**

Сектор	α			R^2		
	1899– 2017 гг.	1899– 1948 гг.	1948– 2017 гг.	1899– 2017 гг.	1899– 1948 гг.	1948– 2017 гг.
Тихоокеанский	0,58	–0,45	0,99	0,41	0,17	0,41
Атлантический	0,45	–0,55	0,98	0,20	0,18	0,27
Европейский	–0,58	0,08	–0,81	0,48	0,0025	0,45
Сибирский	–0,23	–0,98	0,42	0,06	0,22	0,07
Дальневосточный	–0,35	–1,00	0,22	0,13	0,23	0,02
Американский	–0,63	–0,73	–0,59	0,31	0,11	0,11

тренд объясняет около 40–50 % от общей изменчивости исходных значений ПАВ. В Американском секторе этот показатель около 30 % для всего ряда.

Квазипятидесятилетнее колебание в изменении продолжительности арктических вторжений

В отклонениях ПАВ от линейного тренда в разных секторах Северного полушария отчетливо заметно проявление долгопериодных циклических колебаний.

На рис. 1 представлен характер изменения продолжительности, амплитуд и фаз квазипятидесятилетних колебаний ПАВ в различных секторах Северного полушария для двух частей ряда: 1899–1948 и 1948–2017 гг. — после удаления трендов из рядов ПАВ. Рассмотрение параметров 50-летнего колебания для частей ряда диктуется, как было показано ранее, разной надежностью используемых данных ряда ПАВ.

Отклонения ПАВ от линейного тренда (детрендизация ряда) для разных частей ряда ПАВ (см. рис. 1) описаны полиномом 3-й степени (фильтрация методом Савицкого–Голея) и содержат ярко выраженное квазипятидесятилетнее колебание во всех секторах Северного полушария, кроме Европейского, где средняя длительность самого мощного колебания в зависимости от анализируемого периода времени

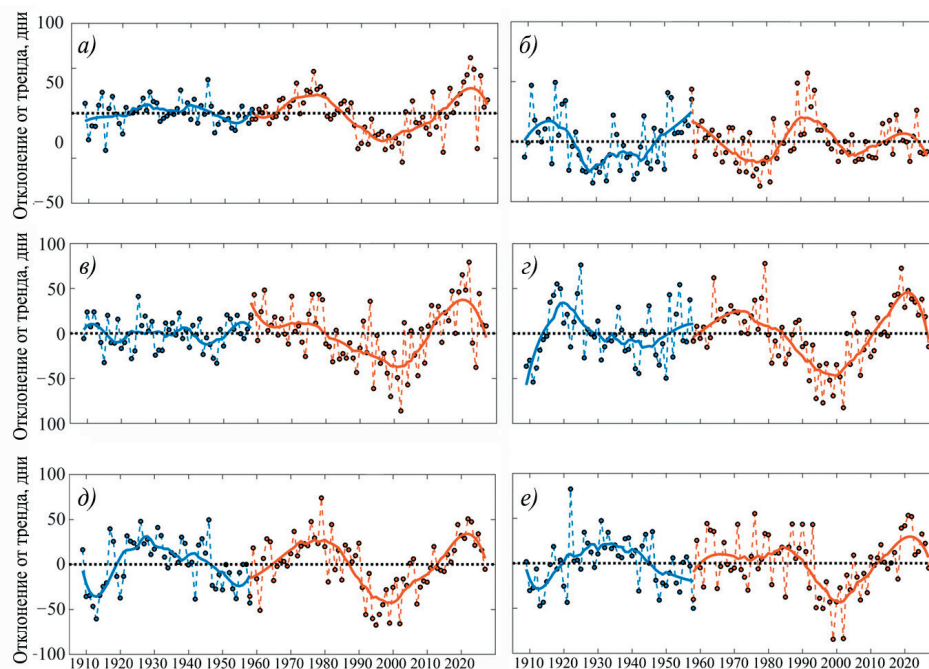


Рис. 1. Отклонения (остатки) частоты арктических вторжений от линейного тренда в секторах Северного полушария и их аппроксимация методом Савицкого–Голея за период с 1899 по 1948 г. и за период с 1948 по 2017 г.; Тихоокеанский (а), Европейский (б), Атлантический (в), Американский (г), Дальневосточный (д), Сибирский (е) секторы

Fig. 1. Deviations (residues) of the Arctic invasion frequency from the linear trend in the Northern Hemisphere sectors and their approximation by the Savitsky–Goley method for the period from 1899 to 1948 and for the period from 1948 to 2017; Pacific (a), European (b), Atlantic (c), American (d), Far Eastern (e), Siberian (f) sectors

составляет от 27 до 38 лет. Амплитуды квазипятидесятилетних колебаний ПАВ возрастают во второй части ряда. Анализ величины удвоенной амплитуды (размаха) квазипятидесятилетнего колебания в разных секторах Северного полушария показал, что она изменялась в небольших пределах (55–65 дней ПАВ), что составляет от 42 % от величины изменчивости ($\pm 2\sigma$ ПАВ) для Сибирского сектора до 60 % для Атлантического.

Фазировка максимумов и минимумов ПАВ квазипятидесятилетних колебаний во всех секторах, кроме Европейского, в общем совпадает, хотя в первой части ряда согласие фаз не всегда отчетливое. Например, в Тихоокеанском, Атлантическом и Американском секторах, где амплитуда колебаний ПАВ в первой части ряда мала, трудно говорить о какой-либо определенной фазировке максимумов и минимумов указанного колебания, что, возможно, связано с отмеченной выше ненадежностью данных этого периода.

Сравнивая величины амплитуд квазипятидесятилетнего колебания ПАВ с величинами линейного тренда ПАВ для последней части ряда в разных секторах Северного полушария, можно заключить, что их величины сравнимы, а в таких секторах, как Американский, Сибирский и Дальневосточный, амплитуды квазипятидесятилетних колебаний ПАВ даже больше, чем трендовая составляющая. Фазы максимумов и минимумов квазипятидесятилетних колебаний совпадают в пяти из шести секторов Северного полушария: максимумы указанных колебаний приходятся соответственно на начало двадцатого столетия, 1960-е гг. и начало текущего столетия (2008–2012 гг.), а минимумы на 1930–1940-е гг., конец 1980-х–начало 1990-х гг. Очередной минимум в продолжительности арктических вторжений может наступить в 2030–2040 гг.

Этот результат является предпосылкой использования выявленных циклов при разработке физико-статистических методов сверхдолгосрочных прогнозов ПАВ.

Таким образом, генеральные особенности изменений продолжительности арктических вторжений в Северном полушарии за период времени с 1899 по 2017 г. состоят в следующем. Изменения продолжительности арктических вторжений имеют сложную временную структуру: кроме векового увеличения продолжительности арктических вторжений, на графиках отчетливо проявляется мощное циклическое колебание, продолжительность которого составляет около 50 лет, а также более слабые колебания в полосе частот 20–30 и 2–9 лет. Подобная цикличность характерна для Тихоокеанского многолетнего колебания [9].

Анализ временной структуры изменений продолжительности арктических вторжений в различных секторах Северного полушария показал наличие трех спектральных полос в изменчивости арктических вторжений. Первая полоса — долгопериодная (трендовая составляющая), ее продолжительность, возможно, выходит за рамки использованного ряда (1899–2017 гг.). На фоне этой трендовой составляющей, которая в различных секторах может быть либо восходящей, либо нисходящей, развиваются колебания большей частоты.

Вторая полоса изменчивости циркуляции занята квазиполувековой составляющей в изменении продолжительности арктических вторжений. Фазировка этого колебания в Атлантическом и Европейском секторах противоположная, что, вероятно, связано с наличием отрицательных телеконнекционных (дальних) связей температуры на западной и восточной частях Исландского центра действия атмосфер.

В Тихоокеанском и Американском секторах характер связи продолжительности арктических вторжений для второй полосы частот существенно отличается от характера такой связи в Атлантическом и Европейском секторах. В Тихоокеанском и Американском секторах связь продолжительности арктических вторжений во второй полосе частот остается синхронной, но менее тесной. Здесь существует Тихоокеанское колебание, обеспечивающее асинхронный характер связи температуры на западной и восточной стороне Алеутского минимума. В этих районах заметно также воздействие на изменение ПАВ Дальневосточного муссона.

Знак трендовой составляющей в изменении продолжительности арктических вторжений в Дальневосточном и Американском секторах совпадает: продолжительность арктических вторжений в указанных секторах уменьшается. Вместе с тем знак линейного тренда в Дальневосточном и Тихоокеанском секторах противоположен, тогда как фазировка квазипятидесятилетних колебаний в Дальневосточном и Тихоокеанском секторах совпадает, и их амплитуда соизмерима с величинами линейных трендов продолжительности арктических вторжений. Амплитуда квазипятидесятилетних колебаний в продолжительности ПАВ в Американском секторе не отличается существенно от амплитуд подобного колебания в Сибирском, Дальневосточном и Тихоокеанском секторах. Имеется и синхронизация данного колебания в этих трех секторах.

Третья полоса частот включает короткопериодные колебания продолжительностью 2–10 лет. Изменения их амплитуд не содержат какого-либо тренда.

Спектральный анализ продолжительности арктических вторжений в разных секторах Северного полушария показал, что наибольшая мощность энергии в изменении ПАВ сконцентрирована в полосе частот 46–52 года в подавляющем числе секторов. Продолжительность этого цикла и его амплитуда несколько изменяются в течение периода с 1899 до 2017 г. Поскольку использованный в работе метод спектрального анализа не обеспечивает получение сплошного спектра в полосе низких частот из-за сравнительно коротких рядов наблюдений ПАВ, определить точную продолжительность и мощность этого колебания не представляется возможным, однако само наличие квазипятидесятилетнего колебания в изменении ПАВ с мало изменяющейся амплитудой и фазой по крайней мере в последние 70 лет не вызывает сомнений.

Мощность квазипятидесятилетнего цикла в изменении ПАВ для разных промежутков времени 118-летнего периода наблюдений изменяется. Она является максимальной со второй половины 60-х гг. прошлого столетия до начала 10-х гг. текущего столетия. Экстремумы разнесены на 22–23 года. Минимумы (максимумы) мощности долгопериодного колебания ПАВ в Европейском секторе разнесены по времени на 20–28 лет, но последний минимум (конец XX – начало XXI в.) совпадает с максимумом ПАВ во всех других секторах Северного полушария.

Спектр короткопериодных колебаний в межгодовых изменениях ПАВ

Рассмотрим короткопериодную часть спектров ПАВ. На рис. 2 и 3 в качестве примера приведены скользящие мощности различных гармоник для Тихоокеанского и Европейского секторов (при использовании 48-летнего скользящего окна). На СВАН-диаграммах (рис. 2а, 3а) приведена мощность гармоник от 2 до 24 лет, а в нижней части рисунков (рис. 2б, 3б) — скользящие значения мощности 48-летней

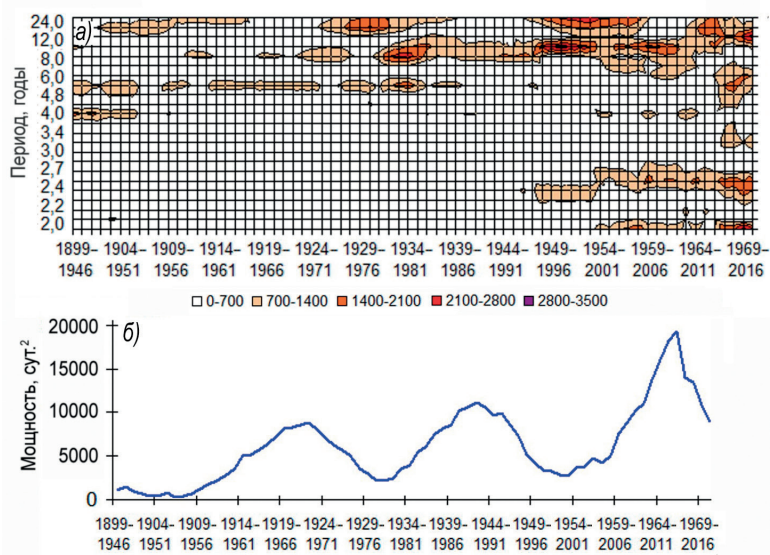


Рис. 2. СВАН-диаграмма продолжительности арктических вторжений для Тихоокеанского сектора Северного полушария с 1899 по 2017 г. (а); скользящие значения мощности 48 летней гармоники (б); скользящее окно — 48 лет

Fig. 2. STAN (spectral-time analysis)-diagrams of the duration of Arctic invasions for the Pacific sector of the Northern Hemisphere from 1899 to 2017 (a); moving spectral power of 48-year harmonic (b); moving window — 48 years

гармоники. В верхней части рисунков густота заливки показывает мощность той или иной гармоники, а горизонтальные контуры, отвечающие периодам гармоник, говорят об устойчивости этих гармоник во времени. В короткопериодной части спектра (2–24 года) определенная устойчивость выявленных квазипериодических компонент в изменении ПАВ во времени характерна лишь для нескольких полос частот в ряде спектров ПАВ в секторах Северного полушария.

1. *Американский сектор.* Устойчивая 8–11-летняя гармоника проявляется в каждом 48-летнем интервале лишь до начала 1990-х гг. Во вторую половину ряда, начиная с 1950-х гг., большая энергия концентрируется в полосе 13–16 лет. Возможная природа последнего цикла может быть связана с 22-летним циклом.

2. *Тихоокеанский сектор.* Начиная с 1930-х гг. устойчивыми во времени гармониками являются 8–10-летние.

3. *Атлантический сектор.* Начиная с конца 1930-х гг. устойчивой во времени гармоникой является 16-летняя, а с конца 1940-х гг. — 2,4–2,5-летняя.

4. *Дальневосточный сектор.* Начиная с 1920-х гг. устойчивыми во времени гармониками являются 3,4–4,2-летние. Другой по продолжительности проявления (с 1940-х гг.) является 16-летняя гармоника.

5. *Европейский сектор.* Для этого сектора только с 1940-х гг. определенной устойчивостью во времени обладают гармоники в интервале около 20–28 лет. Квазидвухлетние колебания имеют пятнистое распределение во времени.

6. *Сибирский сектор.* На СВАН-диаграммах выражена устойчивая во времени полоса спектра 3,4–4,2 года начиная с первого десятилетия прошлого столетия. Вто-

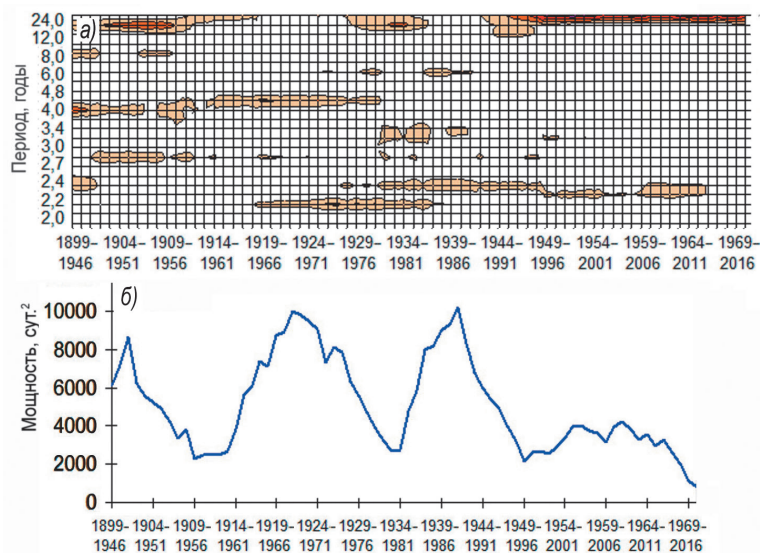


Рис. 3. СВАН-диаграмма продолжительности арктических вторжений для Европейского сектора Северного полушария с 1899 по 2017 г. (а); скользящие значения мощности 48-летней гармоники (б); скользящее окно — 48 лет

Fig. 3. STAN-diagrams of the duration of Arctic invasions for the European sector of the Northern hemisphere from 1899 to 2017 (a); moving spectral power of 48-year harmonic (b); moving window — 48 years

рой менее устойчивой во времени гармоникой является квазидвадцатидвухлетняя гармоника, но она проявилась только с 1940-х гг.

Все вышеназванные гармоники существенно уступают по мощности квазипятидесятилетней.

Что касается короткопериодной полосы частот, результаты спектрального анализа и СВАН-анализа для всего периода времени сводятся к следующему. В океанических секторах и Европейском секторе доминируют циклы продолжительностью около 2,5–3,0 лет. В ряде секторов он устойчив в течение большей части рассмотренного периода. В Дальневосточном и Сибирском секторах более выраженными являются циклы продолжительностью 3,4–3,7 года. В Тихоокеанском секторе большая мощность характерна для полосы частот 8,8–11,0 лет. Продолжительность этого цикла близка к известному 10–11-летнему циклу в солнечной активности. Короткопериодные циклы уступают по мощности квазипятидесятилетнему циклу более чем в 5–10 раз. Исключение составляет циклическая структура ПАВ в Европейском секторе, где амплитуды квазидвадцатидвухлетнего цикла больше, чем квазипятидесятилетнего. 70-летней длины использованных рядов ПАВ крайне недостаточно, чтобы уверенно выделить и тем более обосновать статистическую значимость таких циклов продолжительности арктических вторжений.

Таким образом, спектральный анализ продолжительности арктических вторжений для всего периода времени показал, что, кроме квазипятидесятилетней мощной компоненты в изменении ПАВ, присутствуют еще и слабые по мощности циклы в коротковолновой полосе.

Компонентно-гармонический метод прогностических оценок изменений климата

Рассмотрим в деталях структуру временных рядов продолжительности арктических вторжений в разных секторах Северного полушария. Оказалось, что конкурентом квазипятидесятилетнему колебанию по величине вклада в суммарную изменчивость ПАВ является их линейный тренд, превышающий в ряде секторов Северного полушария даже вес квазипятидесятилетнего колебания. Величина линейного тренда ПАВ в Тихоокеанском и Атлантическом секторах для последней

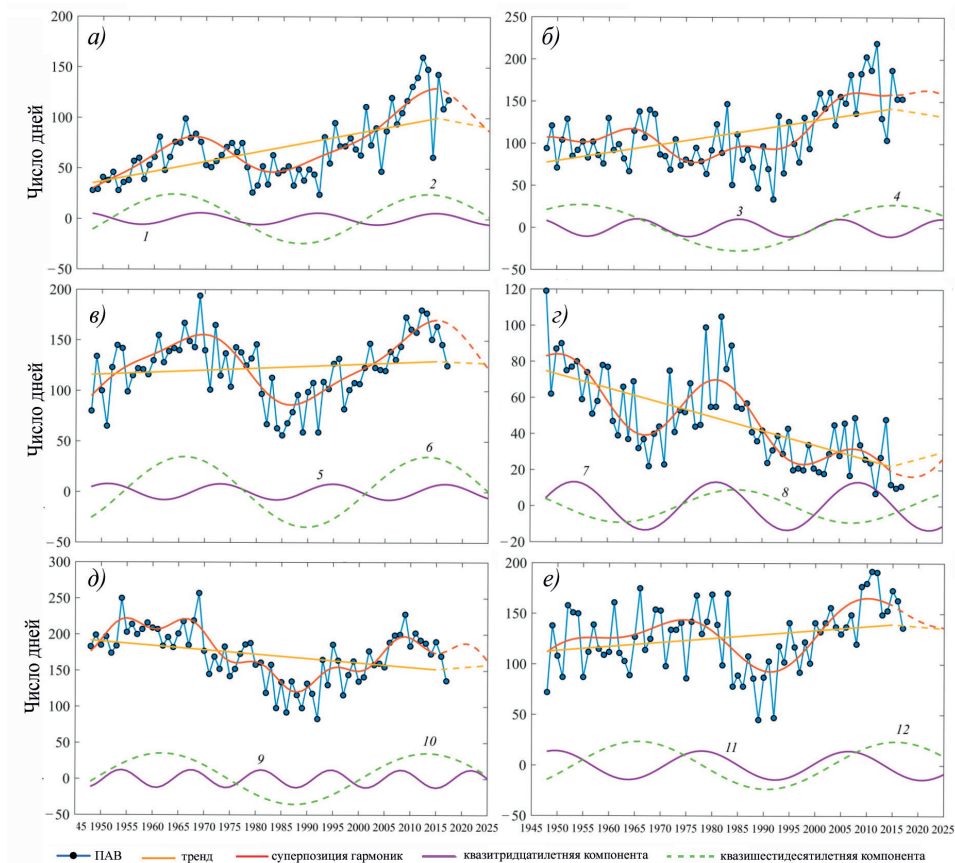


Рис. 4. Временные ряды погодичных продолжительностей арктических вторжений в секторы Северного полушария и их аппроксимация в виде линейного тренда с наложенными на него двумя гармоническими колебаниями с периодами: 23 (1), 49 (2), 20 (3), 61 (4), 22 (5), 47 (6), 27 (7), 45 (8), 14 (9), 51 (10), 28 (11) и 50 (12) лет; Тихоокеанский (а), Атлантический (б), Дальневосточный (в), Европейский (г), Американский (д), Сибирский (е) секторы. Экстраполяция рядов до 2025 г. (пунктир) — расчет по аппроксимационной модели в предположении излома тренда в 2015 г.

Fig. 4. Time series of annual durations of Arctic invasions in the Northern Hemisphere sectors and their approximation by the linear trend with two harmonic fluctuations superimposed on it with periods: 23 (1), 49 (2), 20 (3), 61 (4), 22 (5), 47 (6), 27 (7), 45 (8), 14 (9), 51 (10), 28 (11) and 50 (12) years; Pacific (a), Atlantic (b), Far Eastern (в), European (г), American (д), Siberian (e) sectors. Extrapolation of series to 2025 (dotted line) — calculation based on the approximation model assuming a trend break in 2015

части ряда (1948–2017 гг.), а в Европейском, Тихоокеанском и Американском секторах для всего доступного ряда ПАВ (1899–2017 гг.) была соизмерима с размахом квазипятидесятилетнего колебания.

Тремя компонентами, включающими тренд и две главные гармоники в изменении ПАВ (продолжительность около 50 и 20–28 лет), удовлетворительно описываются изменения ПАВ за период с 1948 по 2017 г. (рис. 4), о чем свидетельствуют высокие коэффициенты корреляции исходных и расчетных (3-компонентная модель) величин. Коэффициенты корреляции сопоставляемых величин оказались максимальными для Тихоокеанского, Европейского и Американского секторов (0,8–0,84) и минимальными для Сибирского сектора (0,65).

Рассчитана доля дисперсии исходного ряда, определяемая k -ой компонентой модели ($k_{1,2,3}$, где k_1 соответствует линии тренда, а k_2 и k_3 — периодическим сигналам), а также доля трехкомпонентной составляющей в общей дисперсии ПАВ с 1948 по 2017 г. (табл. 3).

Таблица 3

Доля выявленных составляющих в общей дисперсии продолжительности арктических вторжений в секторах Северного полушария, %

Table 3

Proportion of detected components in total variance of Arctic invasion duration in the Northern Hemisphere sectors, %

Сектор	Линейный тренд	Долгопериодные квазициклы (число лет)		Трехкомпонентная составляющая
		20–30-летний	50–60-летний	
Тихоокеанский	41,0	1,3 (23)	26,2 (49)	69,6
Европейский	44,6	16,7 (27)	5,8 (45)	67,7
Атлантический	26,6	4,0 (20)	26,2 (61)	46,6
Американский	11,1	6,7 (14)	44,2 (51)	65,1
Дальневосточный	2,0	2,1 (22)	52,2 (47)	56,9
Сибирский	6,9	9,9 (28)	24,9 (50)	39,0

Из табл. 3 следует, что трехкомпонентная составляющая (линейный тренд и выявленные долгопериодные циклы) достаточно хорошо описывает изменчивость ПАВ в секторах Северного полушария, за исключением Сибирского сектора. Ее доля в общей дисперсии ПАВ в Тихоокеанском и Европейском секторах составляет около 70 %, немного меньше в Американском секторе (65 %) и уменьшается до 39 % в Сибирском секторе.

Полученные результаты были использованы для получения прогностических оценок ПАВ на ближайшие десять лет, при этом был принят ряд допущений:

1) изменение знака тренда ПАВ в период с 2010 по 2012 г., о чем свидетельствуют графики изменений ПАВ в различных секторах Северного полушария (см. рис. 4);

2) одинаковая абсолютная величина коэффициентов нисходящего и восходящего линейных трендов ПАВ после точки перелома тренда в 2010–2012 гг.;

3) сохранение в ближайшее десятилетие устойчивости амплитуды и фазы выявленных первой квазипятидесятилетней и второй гармоник в изменении ПАВ.

В табл. 4 приведены рассчитанные с учетом этих предположений прогностические значения повторяемости арктических вторжений в шести секторах Северного полушария до 2025 г. В скобках указаны фактические значения ПАВ в 2016–2017 гг.

Таблица 4

**Прогностические значения повторяемости арктических вторжений
в шести секторах Северного полушария до 2025 г.**

Table 4

**Prognostic values of Arctic invasion recurrence
in six sectors of the Northern Hemisphere until 2025**

Год	Сектор					
	Тихоокеанский	Европейский	Атлантический	Американский	Дальневосточный	Сибирский
2016	127 (109)	18 (10)	158 (153)	175 (170)	170 (146)	155 (163)
2017	124 (118)	17 (11)	159 (153)	177 (136)	168 (125)	152 (136)
2018	121	17	160	181	164	149
2019	116	16	161	185	160	146
2020	112	17	162	187	155	144
2021	107	17	163	188	149	141
2022	101	19	163	185	142	140
2023	96	21	163	180	135	138
2024	91	23	161	173	129	137
2025	87	26	158	164	122	136

Из табл. 4 следует, что в ближайшее десятилетие произойдет уменьшение продолжительности арктических вторжений в Сибирском, Дальневосточном и Тихоокеанском секторах, то есть на большей части Восточного полушария произойдет уменьшение ПАВ и, как следствие, уменьшение повторяемости холодных зим.

В Европейском секторе после 20-х гг. текущего столетия произойдет увеличение продолжительности арктических вторжений и, как следствие, увеличение повторяемости холодных зим начиная с 2022 г.

В Американском секторе в ближайшие несколько лет увеличится продолжительность арктических вторжений, но после 20-х гг. текущего столетия наступит их уменьшение. В Атлантическом секторе эта тенденция менее выражена, и ПАВ изменится незначительно.

Использованные подходы к получению прогностических оценок ПАВ на ближайшее десятилетие требуют отдельного комментария.

Первые два из приведенных выше предположений укладываются в наличие векового цикла, на существование которого обращалось внимание в работах [12, 13]: трендовая составляющая ПАВ во всех секторах в последние 70 лет является восходящей ветвью этого цикла. Если судить об изменениях продолжительности арктических вторжений в последнее десятилетие, то экстремальная точка этого цикла уже пройдена и начиная со второго десятилетия текущего столетия наступила нисходящая ветвь квазивекового цикла. В Тихоокеанском и Европейском секторах скорость падения (роста) составит около 1 дня в год, а в Атлантическом — около 0,8 дня в год. В Дальневосточном и Сибирском секторах скорость падения ПАВ составит соответственно 0,2 и 0,4 дня в год. Предполагается, что в Американском секторе может наступить рост ПАВ со скоростью около 0,5 дня в год. Собственно откорректированные на принятую экспертным путем величину линейного тренда прогностические значения представлены в табл. 4.

Поскольку трендовая составляющая выбирает большую часть дисперсии ряда ПАВ для Тихоокеанского и Европейского секторов Северного полушария, то и коэф-

фициенты корреляции исходных и расчетных (трендовых) значений ПАВ оказались самыми высокими. Прогноз в этом случае сводится в значительной мере к прогнозу тенденций (трендов) в изменении продолжительности арктических вторжений.

Оказалось, что в Тихоокеанском секторе можно ожидать уменьшение значений ПАВ в ближайшее десятилетие, тогда как в Европейском секторе намечился слабый рост ПАВ. Величины трендовых составляющих ПАВ в Американском и Сибирском секторах и особенно в Дальневосточном секторе существенно уступают вкладу квазипятидесятилетнего колебания в изменение ПАВ, и, следовательно, точность прогностических оценок зависит от устойчивости амплитуд и фаз этого колебания. Расчет параметров данной составляющей за весь доступный период наблюдений показал ее устойчивость для всех названных выше секторов.

В меньшей мере это справедливо для Сибирского сектора, где в последние годы (1948–2017 гг.) амплитуда квазипятидесятилетнего цикла только в 1,5 раза превышает амплитуду второго по значимости колебания — 28-летнего. Здесь может наступить слабое уменьшение ПАВ в ближайшее десятилетие, тогда как в изменении продолжительности арктических вторжений в Дальневосточном и Американском секторах Северного полушария намечилось ее устойчивое падение. Прогностические оценки ПАВ в Атлантическом секторе менее определенные: в ближайшие несколько лет скорее может наступить ее стабилизация.

Короткопериодные флуктуации носят случайный характер. Попытка использования авторегрессионных моделей для описания изменчивости ПАВ в короткопериодной области спектра не привела к каким-либо обнадеживающим результатам. Оценки показывают, что спектр короткопериодных составляющих можно описать скорее моделью «белого шума», что не позволяет спрогнозировать изменения ПАВ в этой области спектра.

Следует отметить, что природа выявленных циклов до сих пор остается дискуссионной. Долгопериодное квазипятидесятилетнее колебание считается в большинстве работ автоколебательным [14, 15, 16]. Иногда его связывают с планетными влияниями (Юпитера и Сатурна) [17]. Квазиодиннадцатилетние и квазидвадцатидвухлетние колебания приписывают влиянию солнечной активности, а квазидевятнадцатилетнее колебание — деклинационному лунному приливу в океане [13, 17–19].

Подробное исследование природы квазишестидесятилетнего и квазидвадцатилетнего колебаний в климатической системе изложены в последней монографии В.Ф. Логинова [20].

ВЫВОДЫ

В изменении ПАВ за период с 1899 по 2017 г. выявлены трендовые и циклические составляющие. Наибольший по величине положительный тренд характерен для Тихоокеанского и Атлантического секторов, а отрицательный — для Европейского и Американского секторов.

Трендовая составляющая изменения продолжительности арктических вторжений в Тихоокеанском и Европейском секторах выбирает более 40 % от общей изменчивости исходных значений ПАВ. В Американском секторе тренд ПАВ сохраняет отрицательный знак весь период наблюдений (1899–2017 гг.), коэффициент детерминации составляет около 30 %.

Спектральный анализ продолжительности арктических вторжений, а также спектрально-временной анализ позволили установить наличие в спектрах трендовой

составляющей, квазипятидесятилетней, квазитридцатилетней (для Европейского сектора), квазидвадцатилетней и более короткопериодных квазициклических колебаний: 14–16-, 8–11-, 3–4- и 2-летних.

Наличие таких циклов выявлено не только в результате проведенного спектрального анализа и СВАН, но и более простыми методами сглаживания, а также описания исходных данных полиномом 3-й степени. В совокупности результаты анализа позволяют считать квазипятидесятилетнее колебание достоверно установленным. Исключение составляют изменения ПАВ в Европейском секторе, где в долгопериодной полосе частот доминирующими являются циклы в интервале 20–30 лет.

В отклонениях от тренда отчетливо проявляется достаточно мощная квазипятидесятилетняя составляющая для пяти секторов, кроме Европейского, где доминируют квазитридцатилетние колебания. Большой вклад трендовой и квазипятидесятилетней составляющей в общую изменчивость ПАВ позволил подойти к разработке компонентно-гармонического метода получения прогностических оценок ПАВ на ближайшие 10 лет.

Полученная с помощью метода наименьших квадратов 3-компонентная модель изменчивости ПАВ, включающая линейный тренд, квазипериодические (20–30-летние и 50–60-летние) колебания, описывает более 50 % изменчивости продолжительности арктических вторжений в большинстве секторов. На основании этой модели получены прогнозные оценки повторяемости арктических вторжений в шести секторах Северного полушария до 2025 г.: произойдет уменьшение ПАВ в Сибирском, Дальневосточном и Тихоокеанском секторах, увеличение ПАВ в Европейском секторе, после 20-х гг. текущего столетия, текущий рост ПАВ в Американском, в меньшей степени в Атлантическом секторах сменится после 2020 года снижением..

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках задания 1.06 Государственной программы научных исследований «Природопользование и экология» на 2016–2020 гг.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. The study was supported by the project 1.06 in the framework of the State Program of Scientific Research “Environmental Management and Ecology” for 2016–2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М.: Изд-во РАН, Институт географии, 2009. 370 с.
2. Кононова Н.К. Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1899–2017 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 3. С. 108–123.
3. Холопцев А.В., Семенов В.А., Кононова Н.К. Продолжительные арктические вторжения и Эль-Ниньо–Южное колебание // Известия РАН. Сер. Географическая. 2018. № 4. С. 22–32.
4. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Климатические вариации площади ледяного покрова в Евразийской Арктике и ожидаемые их изменения в XXI в. // Материалы Совета-семинара при Президенте Российской академии наук: Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий. Проблема Киотского протокола. М.: Наука, 2006. С. 353–370.
5. Холопцев А.В., Кононова Н.К., Тимошенко Т.Ю. Арктические блокинги и поверхностные температуры на Европейской территории России // Жизнь Земли. 2017. Т. 39. № 1. С. 20–32.

6. Холопцев А.В., Катунина Е.Н., Тимошенко Т.Ю. Продолжительные арктические вторжения в Атлантическом секторе и атмосферные осадки в Крыму // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2017. Т. 3 (69). № 2. С. 251–267.
7. Холопцев А.В., Подпорин С.А., Курочкин Л.Е. Арктические вторжения и метеоусловия в Азово-Черноморском регионе // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5 (71). № 2. С. 322–331.
8. Дзердзеевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М. Типизация циркуляционных механизмов в Северном полушарии и характеристики синоптических сезонов / Тр. науч.-исслед. учрежд. Гл. управления гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. М., Л.: Гидрометеиздат, 1946. 80 с.
9. Полонский А.Б. Роль океана в изменениях климата. Киев: Наукова думка, 2008. 183 с.
10. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. 652 с.
11. StatSoft (Электронный ресурс). URL: <http://statsoft.ru/company/> (дата обращения 18.10.2019).
12. Рубашев Б.М. Проблемы солнечной активности. М., Л.: Наука, 1964. 362 с.
13. Герман Дж.Р., Голдберг Р.А. Солнце, погода и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 320 с.
14. Шулейкин В.В. Физика моря. М.: Наука, 1968. 1083 с.
15. Угрюмов А.И. Тепловой режим океана и долгосрочные прогнозы погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 176 с.
16. Яковлева Н.И. Эмпирические исследования автоколебательных процессов глобального масштаба в гидросфере и атмосфере Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. 1974. № 43–44. С. 37–47.
17. Scafetta N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. V. 74. P. 145–163.
18. Максимов Н.В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 447 с.
19. Максимов И.В., Смирнов Н.П., Воробьев В.Н. Долгосрочный прогноз многолетних изменений общей ледовитости Баренцева моря, составленный компонентно-гармоническим методом // Материалы рыбохозяйственных исследований Северного бассейна. 1964. Вып. 4. С. 73–85.
20. Логинов В.Ф. Космические факторы климатических изменений. Минск, 2020. 168 с.

REFERENCES

1. Kononova N.K. Klassifikatsiia tsirkulatsionnykh mekhanizmov Severnogo polushariia po B.L. Dzerdzevskomu. Classification of circulation mechanisms of the Northern hemisphere by B.L. Dzerdzevsky. Moscow: Russian Academy of Sciences, Institute of geography, 2009: 370 p. [In Russian].
2. Kononova N.K. Types of global circulation of the atmosphere: the results of monitoring and retrospective evaluation for 1899–2017 years. *Fundamental'naia i prikladnaia klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2018, 3: 108–123. [In Russian].
3. Kholoptsev A.V., Semenov V.A., Kononova N.K. Long Arctic invasion and the El Niño–southern oscillation. *Izvestiia Rossiiskoi Akademii nauk. Seriya Geograficheskaya*. News of the Russian Academy of Sciences. Geographic series. 2018, 4: 22–32. [In Russian].
4. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolianitskii V.M. Materialy Soveta-seminara pri Prezidente Rossiiskoi akademii nauk “Vozmozhnosti predotvrashcheniia izmeneniia klimata i ego negativnykh posledstvi. Problema Kiotskogo protokola”. Climatic variations of the ice cover area in the Eurasian Arctic and their expected changes in the XXI century. Proceedings of the Council-seminar

- under the President of the Russian Academy of Sciences “Opportunities to prevent climate change and its adverse effects. The problem of the Kyoto Protocol”. Moscow: Nauka, 2006, 353–370. [In Russian].
5. Kholoptsev A.V., Kononova N.K., Timoshenko T.Iu. Arctic blocking and surface temperatures in the European territory of Russia. *Zhizn' Zemli*. Earth life. 2017, 39, 1: 20–32. [In Russian].
6. Kholoptsev A.V., Katunina E.N., Timoshenko T.Iu. Continued Arctic invasions in the Atlantic sector and precipitation in Crimea. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografiia. Geologiya*. Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology. 2017, 3 (69), 2: 251–267. [In Russian].
7. Kholoptsev A.V., Podporin S.A., Kurochkin L.E. Arctic invasions and weather conditions in the Azov-Black Sea region. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografiia. Geologiya*. Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology. 2019, 5 (71), 2: 322–331. [In Russian].
8. Dzerdzeevskii B.L., Kurganskaia V.M., Vitvitskaia Z.M. *Tipizatsiia tsirkulatsionnykh mekhanizmov v Severnom polusharii i kharakteristiki sinopticheskikh sezonov*. Typification of circulation mechanisms in the Northern hemisphere and characteristics of synoptic seasons. Proceedings of the research institution of the Main Department of hydrometeorological service of the Council of Ministers of the USSR. Ser. 2. Synoptic meteorology. V. 21. Moscow, Leningrad: Hydrometeoizdat, 1946: 80 p. [In Russian].
9. Polonskii A.B. *Rol' okeana v izmeneniiakh klimata*. The role of the ocean in climate change. Kiev: Naukova dumka, 2008: 183 p. [In Russian].
10. *Atlas vremennykh variatsii prirodnnykh, antropogennykh i sotsial'nykh protsessov*. Atlas of temporal variations of natural, anthropogenic and social processes. V. 3. Natural and social spheres as part of the environment and as objects of influence. Moscow: Ianus-K, 2002: 652 p. [In Russian].
11. StatSoft (Elektronnyi resurs). URL: <http://statsoft.ru/company/>. StatSoft (Electronic resource). [In Russian]. Available at: <http://statsoft.ru/company/> (accessed 18.10.2019).
12. Rubashev B.M. *Problemy solnechnoi aktivnosti*. Problems of solar activity. Moscow; Leningrad: Nauka, 1964: 362 p. [In Russian].
13. German Dzh.R., Goldberg R.A. *Solntse, pogoda i klimat*. The sun, weather and climate. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 320 p. [In Russian].
14. Shuleikin V.V. *Fizika moria*. Physics of the sea. Moscow: Nauka, 1968: 1083 p. [In Russian].
15. Ugriumov A.I. *Teplovoi rezhim okeana i dolgosrochnye prognozy pogody*. Thermal mode of ocean and long-term weather forecasts. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 176 p. [In Russian].
16. Iakovleva N.I. Empirical studies of global-scale self-oscillating processes in the earth's hydrosphere and atmosphere. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 1974, 43–44: 37–47. [In Russian].
17. Scafetta N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2012, 74: 145–163.
18. Maksimov N.V. *Geofizicheskie sily i vody okeana*. Geophysical forces and ocean waters. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970: 447 p. [In Russian].
19. Maksimov I.V., Smirnov N.P., Vorob'ev V.N. Long-term forecast of long-term changes in the total ice content of the Barents sea, compiled by the component-harmonic method. *Materialy rybokhoziaistvennykh issledovaniy Severnogo basseina*. Materials of fisheries research in the Northern basin. 1964, 4: 73–85. [In Russian].
20. Loginov V.F. *Kosmicheskie faktory klimaticheskikh izmenenii*. Space factors of climate change. Minsk, 2020: 168 p. [In Russian].