

Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 452—473.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(80):452—473.

Научная статья

УДК 551.513:001.891.573

doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-452-473

Статистические структура и модели долговременных колебаний форм циркуляции атмосферы Вангенгейма с учетом гидрометеорологических и астрогеофизических факторов

Леонид Александрович Тимохов, Владимир Васильевич Иванов

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ltim@aari.ru

Аннотация. Выполнен анализ структуры долговременных (внутривековых) колебаний форм циркуляции атмосферы по классификации Вангенгейма и исследована сопряженность изменений форм циркуляции с гидрометеорологическими и астрогеофизическими характеристиками. Получены статистические связи между формами циркуляции атмосферы как синхронно, так и с предысторией развития каждой формы циркуляции и с индексами теплового состояния Северной Атлантики (АМО) и Тихого океана (PDO). Разработаны статистические модели долгопериодных изменений средних трехлетних скользящих чисел форм циркуляции с учетом гидрометеорологических и астрогеофизических факторов. Даны оценки вклада предикторов в изменчивость форм циркуляции атмосферы. Сделан вывод о возможности применения полученных моделей для диагностических расчетов форм циркуляции атмосферы и разработки статистических моделей сверхдолгосрочного прогноза.

Ключевые слова: формы циркуляции атмосферы Вангенгейма-Гирса, статистические модели, гидрометеорологические и астрогеофизические факторы, предвычисление форм циркуляции атмосферы.

Для цитирования: Тимохов Л. А., Иванов В. В. Статистические структура и модели долговременных колебаний форм циркуляции атмосферы Вангенгейма с учетом гидрометеорологических и астрогеофизических факторов // Гидрометеорология и экология. № 80. С. 452—473. doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-452-473.

Original article

Statistical structure and models of long-term oscillations of Wangenheim atmospheric circulation patterns taking into account hydrometeorological and astrophysical factors

Leonid A. Timokhov, Vladimir V. Ivanov

Arctic and Antarctic Research Institute, ltim@aari.ru

Summary. The analysis of the statistical structure of long-term (more than 1—3 years) changes in circulation patterns according to the Wangenheim classification has been performed. It has been established that the forms of atmospheric circulation W and E have the greatest linear trend (while their trend signs are opposite), and the form C has a weak negative trend. Spectral analysis demonstrates that in the

© Тимохов Л. А., Иванов В. В., 2025

interannual fluctuations of the W, E, and C circulation patterns, there are cycles with a period of 2—3 years and 5—6 years and 7—9 years. The largest amplitudes occur in cycles of 20—25 years, 40—42 years, and according to the nonlinear trend, we can assume the presence of cyclicity with a period of 80—100 years in the fluctuations of the shapes of W and E, and in the changes of the shape of C there is a cyclicity with a period of about 60—80 years.

The statistical relationship of the average annual forms of W, E and C with their prehistory has been established: For W, the relationship with the past levels of the time series can reach 11—12 years, for E it can reach 10 years, and for form C it can reach 6—7 years. The statistical relationship of the average three-year form W with the previous values (background) of the time series is noted up to 6 years, form E can reach 4—5 years, and the relationship of form C with the background can last only up to 2—3 years.

Correlation analysis revealed that the western form of the W(0) circulation is statistically closely related to the prehistory of its development (W(−1)–W(−4)) and to the eastern form of E(0) and its prehistory. However, the statistical relationship with the meridional form C(0) and its prehistory is very weak, below the significance level. The eastern form of the E(0) circulation is statistically closely related to its prehistory and the Western form of the W(0) circulation and its prehistory. But the correlation of the E(0) shape with the meridional C(0) shape is weak and even below the significance level. The statistical relationship of the meridional circulation form C(0) with the prehistory decreases quite rapidly, the correlation coefficient with C(−3) is already less than 0.6. Changes in C(0) practically do not correlate with the Western form of W(0) and its prehistory. The circulation form C(0) is statistically related by correlation coefficients less than 0.5 with the eastern form E(0) and its prehistory.

Statistical models of long-term fluctuations in the normalized three-year moving averages of circulation anomalies for the period 1921—2020 with hydrometeorological and astrophysical predictors have been developed, and estimates of the contribution of each predictor to the variance of the predictors have been obtained. The correspondence of the atmospheric circulation forms calculated by the equations allows us to conclude that it is possible to use the developed models for diagnostic calculations of atmospheric circulation forms based on Wangenheim typing.

Experimental calculations of the average three-year sliding values of atmospheric circulation patterns for the period up to 2030 have been performed. Precalculation using statistical models with hydrometeorological predictors and models with astrophysical predictors shows good agreement, which allows using both approaches to calculate the long-period variability of the Wangenheim atmospheric circulation patterns. However, when developing a method for ultra long-term prediction of atmospheric circulation patterns based on statistical models, it is important to test how much the models lose accuracy when switching to calculations based on independent data, i.e. to investigate the stability of statistical equations outside of a number of predictors that participated in the development of these equations.

An equally important step in the development of an ultra long-term forecasting method is the procedure for identifying the physical mechanisms of influence of predictors and describing their direct or indirect effects on the variability of atmospheric circulation patterns.

These procedures will make it possible to use the approaches proposed above for the statistical description of long-term changes in circulation patterns (using both hydrometeorological and astrophysical predictors, as well as their combinations) to develop an ultra long-term (more than a year) calculation and forecast of atmospheric circulation patterns according to the Wangenheim classification for the Arctic.

Keywords: atmospheric circulation patterns according to Vangenheim's classification, long-term changes, oscillation structure and statistical models, hydrometeorological and astrophysical factors, predicting changes in atmospheric circulation patterns.

For citation: Timokhov L. A., Ivanov V. V. Statistical structure and models of long-term oscillations of Wangenheim atmospheric circulation patterns taking into account hydrometeorological and astrophysical factors. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(80):(452—473). doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-452-473. (In Russ.).

Введение

Атмосферная циркуляция является важнейшей компонентой климатической системы. Особенности изменения атмосферной циркуляции несомненно стали одним из основных показателей быстрого изменения климата в Арктике в конце

XX в. — в начале XXI в. Климатические изменения характеризовались перестройкой крупномасштабных атмосферных процессов [1], аномальным изменением средней температуры воздуха в зимний и летний периоды [2], уменьшением летней ледовитости арктических морей, площади льдов в сентябре на акватории Северного Ледовитого океана [3, 4, 5] и других показателей климата [6, 7, 8, 9]. Состояние циркуляционного и теплового режима в Арктике и сценарии их межгодовых и внутривековых изменений являются важнейшей информацией гидрометеорологического обеспечения деятельности в Арктике, а развитие методов описания долгопериодных колебаний характеристик арктической атмосферы — актуальной задачей гидрометеорологии.

По классификации Г. Я. Вангенгейма, выполненной для атлантико-европейского сектора, многообразие синоптических процессов удалось свести к 26 типам, а их, в свою очередь, обобщили в три основные циркуляционные формы: западную (W), восточную (E) и меридиональную (C) [10]. При развитии процессов западной и восточной форм исландский минимум хорошо развит и его центр близок к своему многолетнему положению, особенно при западной форме циркуляции. При этом в кульминационной стадии развития восточной формы исландский минимум более глубокий, чем при западной форме, и центр его над Северной Атлантикой по сравнению с нормой несколько смещен к юго-востоку [1].

Для меридиональной формы циркуляции характерны циклические многолетние колебания. При прогрессивных меридиональных процессах в кульминационной стадии их развития исландский минимум в районе своего среднего климатического положения отсутствует. Над районом Исландии проходит ось гребня азорского либо арктического антициклона. Наиболее активная циклоническая деятельность отмечается западнее и восточнее оси этого гребня. Как описывают авторы [11], «при развитии западной формы циркуляции над атлантико-европейским сектором в Арктике преобладают процессы антициклонической группы и отрицательные значения аномалий индекса циркуляции. При высокоширотной зональной циркуляции теплые атлантические циклоны, огибая Скандинавию, проникают далеко в Арктику, принося туда тепло. В этом случае при развитии западной формы циркуляции над атлантико-европейским сектором в Арктике уже преобладают процессы циклонической группы с западными воздушными потоками и положительными значениями аномалии индекса зональности» [11].

Было показано, что смена основных форм и их разновидностей в атлантико-европейском секторе (северного) полушария является более значимой по сравнению с процессами тихоокеанско-американского сектора для смены циркуляции атмосферы в полярном регионе. В многолетних колебаниях основных форм циркуляции атмосферы наблюдаются длительные тенденции (циркуляционные эпохи) и отмечается связь циркуляционных эпох и периодов потепления и похолодания Арктики [1].

Причины зарождения и развития той или иной формы циркуляции, механизм макропреобразований одной формы циркуляции в другую обсуждались во многих публикациях. Так, установлено, что любое из трех основных состояний атмосферной циркуляции (форм W, E, C) проходит три стадии развития: прогрессивную,

регенерирующую и деградирующую [10]. Каждый макропроцесс в атмосфере, проходя разные стадии своего развития, приводит к такому сочетанию адвективных и динамических условий, при которых он самоликвидируется и переходит обычно в макропроцесс другой формы. Анализ исторических рядов метеорологических данных показывает, что новый процесс зарождается в недрах определенной эпохи, причем чаще в ее последних стадиях [1].

Дыдина Л. А. в монографии [12] описывает следующим образом механизм макропреобразований форм циркуляции: «Основными из воздушных течений являются зональный и меридиональный переносы. Вследствие неравномерного междуширотного распределения тепловой энергии и неоднородности подстилающей поверхности земли систематически происходит смена одних установившихся направлений переносов другими. Условия для смен подготавливаются в течение существующего в данный период процесса. Так, усиление скорости зональной циркуляции вызывает в конечном итоге усиление циклонической деятельности в умеренных широтах, что в свою очередь способствует возникновению меридиональных течений. Меридиональные же течения обуславливают ослабление междуширотных температурных градиентов и ослабление циклонической деятельности, что приводит к уменьшению меридиональных слагающих движения циклонов и антициклонов и в итоге — к установлению снова зонального переноса» [12].

Цель настоящей статьи состоит в анализе структуры долговременных (внутривековых) колебаний форм циркуляции атмосферы по классификации Вангенгейма и сопряженности изменений форм циркуляции атмосферы с гидрометеорологическими и астрогеофизическими характеристиками. Для этого осуществляется построение статистических уравнений внутривековых изменений аномалий трехлетних средних скользящих значений форм атмосферной циркуляции в Арктике и выполняются оценки вклада вариаций внутренних (гидрометеорологических) и внешних (астрогеофизических) факторов в дисперсию изменчивости числа форм циркуляции атмосферы в Арктике. Кроме того, выполнено опытное предвычисление форм циркуляции до 2030 г.

Исходные данные

Для анализа статистической структуры и исследования сопряженности долговременных изменений форм циркуляции атмосферы Вангенгейма с гидрометеорологическими и астрогеофизическими характеристиками использовались временные ряды следующих параметров:

- Аномалии годового числа дней с западной W, восточной E и меридиональной C формами циркуляции атмосферы по классификации Вангенгейма за период с 1901 г. по 2022 г. Величины аномалий годового числа дней этих форм циркуляции атмосферы рассчитаны по данным Каталога форм циркуляции, составленного в ААНИИ. Климатическая норма составляла: для формы W средняя повторяемость равна 127 дней в год, для формы E — 145 дней в год, для формы C — 93 дней в год [1].

- Индексы теплового состояния океана за период с 1901 г. по 2022 г.: Атлантическая мультideкадная осцилляция (Atlantic multidecadal oscillation, АМО), отражающая долгопериодную изменчивость поверхностной температуры Северной Атлантики, и Тихоокеанское декадное колебание (Pacific Decadal Oscillation, PDO), характеризующее долгопериодную изменчивость поверхностной температуры в северной части Тихого океана, значения которых взяты из сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

- Аномалии площади льдов в августе (ледовитость) Lw западных арктических морей (Гренландское, Баренцево и Карское) и ледовитость Le восточных арктических морей (Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское), составленные авторами монографии (Фролов и др., [4]) за период с 1900 г. по 2004 г. Для периода с 2004 г. по 2021 г. величины ледовитости были рассчитаны с использованием базы ледовых данных ААНИИ [Единая система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <http://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php>].

- Годовой приход солнечной радиации Q на верхнюю границу атмосферы Земли в полярной зоне, связанным с небесно-механическими процессами. Эти переменные рассчитаны для периода с 1901 г. по 2030 г. по данным Костина и Федорова <http://www.solar-climate.com/en/ensc/basard.htm/>, где авторы учитывали изменения расстояния между Землей и Солнцем, изменения наклона оси вращения Земли в результате прецессии и нутации и др. [13].

- Градиент инсоляции (инсоляционная контрастность [14]), в качестве которой нами использована разность инсоляции в широтных зонах $45\text{--}65^\circ$ и $65\text{--}85^\circ$ с.ш., обозначенная индексом $dQ = Q_{45-65} - Q_{65-85}$.

- Изменения среднегодовых значений солнечной радиации, связанных с изменением активности Солнца (индекс SA, среднегодовые значения чисел Вольфа https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt).

- Разность $dSA = SA(0) - SA(-10)$, которая означает разность от поступления от Солнца энергии в 0-й и 10-й годы. Этот индекс в первом приближении воспроизводит структуру квазидвадцатилетнего цикла вариации инсоляции [13].

- Для характеристики скорости вращения Земли были взяты средние годовые вариации продолжительности суток, индекс lod (length of day), заимствованные с сайта <ftp://ftp.nga.mil/pub2/gps/eopp/yuuueopp/EOPPyddd.TXT>. Уменьшение продолжительности суток lod соответствует увеличению скорости вращения Земли и, наоборот.

- Индекс изменения скорости вращения Земли $d lod_i = (lod_{i+1} - lod_{i-1})/2$.

- Вариации среднегодовых значений координат полюса Земли (dX и dY) и параметров наклона оси Земли (долготный $d\psi$ и угловой $d\epsilon$ индексы), которые рассчитаны по данным сайта <ftp://ftp.nga.mil/pub2/gps/eopp/yuuueopp/EOPPyddd.TXT>.

- Аномалии среднегодового суммарного момента инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы J_s , временной ряд которого был предоставлен Б. Г. Шерстюковым [15].

- Аномалии силы притяжения между Землей и планетами Уран и Сатурн F_{Ur} и F_{Sat} соответственно, которые были вычислены по данным расстояния между Землей планетами, приведенные на "https://soft_ok.net/226_astroprocessor_zet-9-lite.html".

Структура межгодовых и вековых колебаний форм циркуляции атмосферы

Характер межгодовых изменений числа дней в году различных форм циркуляции атмосферы демонстрируется на рис. 1. Из рисунка видно, что наибольший линейный тренд имеют формы W и E, при этом знак трендов у них противоположный. Среднегодовое число формы С имеет слабый отрицательный тренд.

Как отмечается в работе [11], при W и E-формах в регионе Северной Атлантики наблюдается идентичный зональный ветровой режим, поэтому в исследованиях часто используют характеристику (W + E), временная изменчивость которой также приведена на рис. 1.

Для анализа внутренней структуры временных рядов был выполнен спектральный анализ, рассчитаны автокорреляционные функции и кросс-корреляция среднегодовых величин форм циркуляции. По данным спектрального анализа в межгодовых колебаниях форм циркуляции W, E и С присутствуют цикличности с периодом 2—3, 5—6 и 7—9 лет. Наибольшие амплитуды приходятся на цикличности 20—25 лет, 40—42 года, и по нелинейному тренду можно предположить присутствие цикличности с периодом 80—100 лет в колебаниях форм W и E, а в изменениях формы С отмечается цикличность с периодом около 60—80 лет. Важным свойством долгопериодных колебаний индекса (W + E) является его синхронная оппозиция колебаниям формы С. Значимый синхронный коэффициент корреляции между ними равен $R = -0,94$.

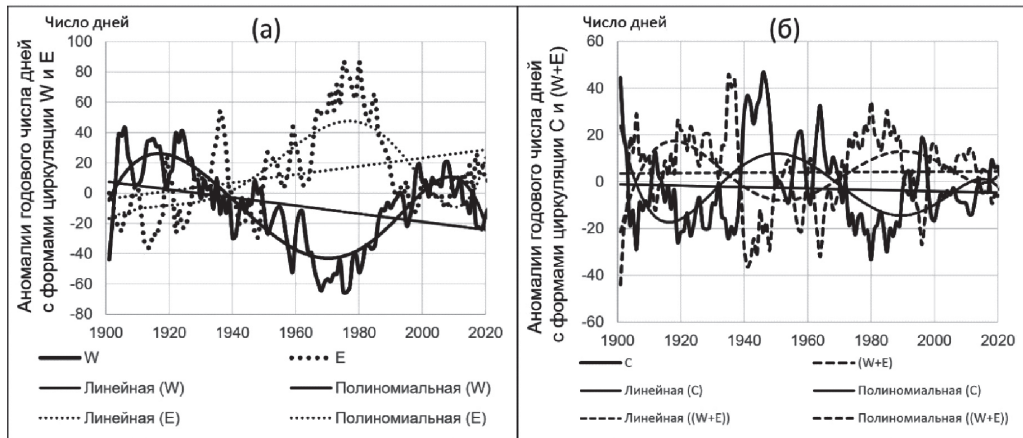


Рис. 1. Внутривековые изменения аномалий средних годовых чисел форм циркуляции атмосферы: западной W, восточной E, меридиональной C и суммы западной и восточной (W + E). На рисунке также представлены линейные и полиномиальные 6-й степени тренды форм циркуляции атмосферы.

Fig. 1. Intra-century changes in anomalies of average annual numbers of atmospheric circulation forms: western W, eastern E, meridional C and the sum of western and eastern (W + E). The figure also shows linear and 6th-degree polynomial trends of atmospheric circulation forms.

Дополнительно к спектральным характеристикам особенности внутренней структуры временного ряда описываются автокорреляционными функциями, коэффициентами корреляции, которые служат мерой связи между текущими и предшествующими (предыстория) данными временных рядов. На рис. 2 приведены нормированные автокорреляционные функции среднегодового числа форм циркуляции атмосферы W, E, C (a) и средних трехлетних скользящих чисел форм W*, E*, C*. Сравнение рис. 2 а и рис. 2 б показывает значительное изменение вида автокорреляционных функций при изменении масштаба осреднения от годового к трехлетнему. Коррелограммы среднегодовых форм W, E и, особенно, средних трехлетних W*, E* довольно плавно уменьшаются с увеличением временного лага, что может свидетельствовать об определенной зависимости этих форм от предыстории. Так, статистическая связь формы W с предысторией может отмечаться до 11—12 лет. Статистическая связь формы E с прошлыми уровнями временных рядов может достигать 10 лет, а для формы C до 6—7 лет.

Если использовать в качестве критерия значимости коэффициент корреляции $R > 0,60$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$, то статистическая связь средней трехлетней формы W* с предыдущими значениями (предыстория) временного ряда отмечается до 6 лет. Статистическая связь формы E* с предыдущими уровнями временных рядов может достигать 4—5 лет, а связь формы C* с предысторией может сохраняться только до 2—3 лет. Полученные оценки не следует связывать

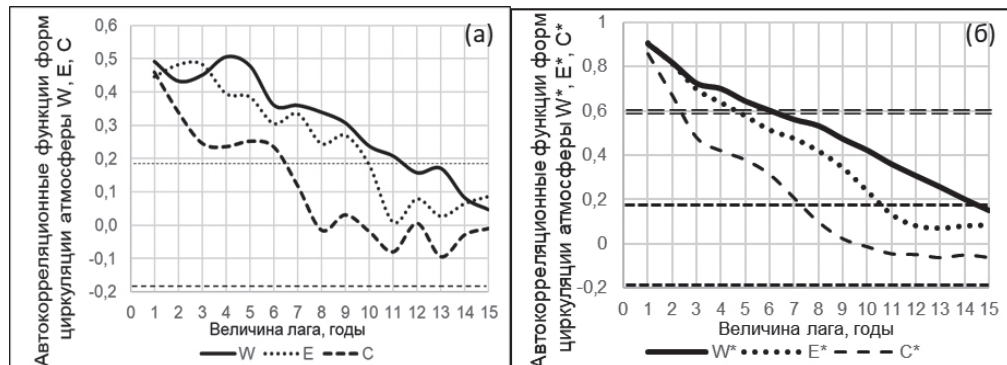


Рис. 2. Нормированные автокорреляционные функции среднегодовых чисел форм W, E, C (a) и трехлетних скользящих W*, E*, C* (б) величин форм циркуляции атмосферы.

Горизонтальные штриховые линии ограничивают значения коэффициентов корреляции $R = 0,185$ — расчетный предел значимости коэффициента корреляции по программе «Статистика» для использованных рядов продолжительностью 120 лет, и $R = 0,60$ — средний коэффициент корреляции, между критическим значением коэффициента корреляции и его максимально возможным ($R < 1,0$).

Fig. 2. Normalized autocorrelation functions of the average annual numbers of forms W, E, C (a) and three-year moving W*, E*, C* (b) of the values of atmospheric circulation forms.

The horizontal dashed lines limit the values of the correlation coefficients $R = 0,185$ — the calculated significance limit of the correlation coefficient according to the “Statistics” program for the used series with a duration of 120 years, and $R = 0,60$ — the average correlation coefficient between the critical value of the correlation coefficient and its maximum possible ($R < 1,0$).

с продолжительностью существования форм циркуляции атмосферы. Результаты анализа автокорреляционных функций дают только представление о статистической связи среднегодовых и средних трехлетних значений форм циркуляции с предысторией. На длительность существования (стадии) конкретной формы циркуляции атмосферы влияют взаимодействие форм циркуляции между собой и воздействие других факторов. По оценке [1], длительность циркуляционной стадии, характеризуемой преобладанием одной или двух основных форм циркуляции, колеблется от 2 до 8 лет.

Учитывая зависимость форм циркуляции от предыстории, были рассчитаны парные коэффициенты корреляции как между формами циркуляции синхронно, так и с предшествующими их значениями до четырех лет. Поскольку в дальнейшем будут исследоваться только трехлетние средние скользящие значения характеристик, то индекс «*» будет опущен. В табл. 1 приведены матрица корреляционной связи форм W, E, C как между собой их синхронных значений (в скобках указан «0»), так и с предшествующими значениями, для которых в скобках указан временной лаг в годах со знаком минус.

Таблица 1

Корреляционная матрица связи средних трехлетних форм W, E, C между собой синхронно и с предысторией до четырех лет.

Значимые коэффициенты корреляции выделены полужирным шрифтом

Correlation matrix of the relationship of the average three-year forms W, E, C with each other synchronously and with a history of up to four years.

Significant correlation coefficients are highlighted in bold

	W(0)	W(-1)	W(-2)	W(-3)	W(-4)	C(0)	C(-1)	C(-2)	C(-3)	C(-4)	E(0)	E(-1)	E(-2)	E(-3)	E(-4)
W(0)	1,00	0,91	0,84	0,76	0,76	-0,10	-0,10	-0,09	-0,12	-0,16	-0,80	-0,73	-0,67	-0,61	-0,60
E(0)	-0,80	-0,76	-0,74	-0,69	-0,68	-0,48	-0,40	-0,29	-0,16	-0,09	1,00	0,91	0,82	0,70	0,65
C(0)	-0,10	-0,06	0,01	0,04	0,03	1,00	0,87	0,67	0,50	0,45	-0,48	-0,44	-0,40	-0,31	-0,25

Результаты табл. 1 показывают, что западная форма циркуляции W(0) статистически тесно связана с предысторией ее развития (W(-1)—W(-4)) и с восточной формой E(0) и ее предысторией. Но с меридиональной формой C(0) и ее предысторией статистическая связь очень слабая, ниже уровня значимости. Восточная форма циркуляции E(0) статистически тесно связана с ее предысторией и с западной формой циркуляции W(0) и ее предысторией. Но корреляция формы E(0) с меридиональной формой C(0) слабая и ниже уровня значимости.

Статистическая связь меридиональной форма циркуляции C(0) с предысторией достаточно быстро убывает, коэффициент корреляции с C(-3) уже меньше 0,6. Изменения C(0) практически не коррелирует с западной формой W*(0) и ее предысторией. Форма циркуляции C(0) статистически связана коэффициентами корреляции меньше 0,5 с восточной формой E(0) и ее предысторией.

Полученные результаты согласуются с выводами Дыдиной [12]. По ее расчетам для макропроцессов продолжительностью более 2,7 месяца наиболее часто в летний период 1939—1961 гг. наблюдались периоды развития E из W (W→E)

и W из E ($E \rightarrow W$), их повторяемость составила 12,8 и 14,2 %. По нашим данным (табл. 1, первая и вторая строки), коэффициенты корреляции формы E с предысторией формы W, а также формы W с предысторией формы E, довольно большие, от $-0,60$ до $-0,76$ (знак минус означает, что уменьшение аномалии форма E сопряжено с увеличением аномалии формы W и, наоборот). По Дыдиной [12], число периодов развития ($E \rightarrow C$), ($C \rightarrow E$) и ($E \rightarrow W$) оказались в несколько раз меньше, соответственно 1,8; 4,0 и 2,9 %; а число случаев периода развития C из W ($W \rightarrow C$) оказался равным нулю. Результаты корреляционного анализа в табл. 1 подтверждают выводы Дыдиной и для формы C.

С помощью кросс-корреляционного анализа была также исследована связь между формами циркуляции и индексами теплового состояния северных частей Атлантического АМО и Тихого океанов PDO. В табл. 2 приведены величины наибольшего коэффициента корреляции и временной лаг (отрицательная величина в скобках в годах) запаздывания предиктантов (форм циркуляции) по отношению к предиктору. Коэффициенты корреляции форм циркуляции атмосферы с индексами АМО и PDO невысокие. Опережение индекса АМО составляет 13 лет для формы W и 8 лет для формы C, а опережение индекса PDO равно 2 годам для формы E.

Таблица 2

Парные максимальные коэффициенты кросс-корреляции аномалий средних трехлетних чисел форм циркуляции атмосферы с индексами АМО, PDO

Paired maximum cross-correlation coefficients of anomalies of average three-year numbers of atmospheric circulation forms with АМО, PDO indices

	АМО	PDO
W	$-0,47(-13)$	—
E	—	$-0,11(-2)$
C	$0,55(-8)$	—

Таким образом, нами впервые получены асинхронные статистические связи между формами циркуляции атмосферы, причем установлена связь с предысторией развития каждой формы циркуляции и с индексами АМО, PDO (табл. 1 и 2).

Статистические модели долгопериодной изменчивости с включением гидрометеорологических предикторов

Наличие значимых значений парных коэффициентов корреляции между формами циркуляции атмосферы и индексами АМО, PDO свидетельствует об их определенном вкладе в дисперсию изменчивости форм циркуляции атмосферы, поэтому была поставлена задача получения многофакторных связей каждой формы циркуляции с другими формами и индексами АМО и PDO. Разработка статистических моделей связи формы циркуляции атмосферы с предысторией форм циркуляции атмосферы и индексами АМО, PDO выполнялась по программам «Статистика» (<http://statistica.ru/theory>). При этом все переменные были нормированы на среднее квадратическое отклонение. С помощью пошаговой процедуры

множественной линейной регрессии методом последовательного включения переменных [16] с учетом результатов табл. 1 и табл. 2 были разработаны оптимальные модели долговременных колебаний форм циркуляции с использованием временных рядов 1921—2020 гг. Учитывая характер автокорреляционных функций (рис. 2), формы циркуляции с предысторией более четырех лет и частными коэффициентами корреляции меньше 0,22 были исключены из уравнений, но предикторы PDO и AMO сохранены.

В результате была получена следующая система статистических уравнений:

$$h<W> = 0,78W(-1) - 0,31W(-3) - 0,48E(-4) - 0,22C(-4) - 0,18AMO(-13); \quad (1)$$

$$h<E> = 0,98E(-1) - 0,50E(-3) + 0,35E(-4) - 0,16W(-3) - 0,09PDO(-2); \quad (2)$$

$$h<C> = 0,92C(-1) - 0,60C(-3) + 0,49C(-4) - 0,19E(-1) + \\ + 0,18E(-4) + 0,14AMO(-8). \quad (3)$$

В моделях (1—3) для отличия рассчитываемых по уравнениям величин форм циркуляции от наблюдаемых форм циркуляции введены обозначения $h<W>$, $h<E>$, $h<C>$. В уравнения (1)—(3) в качестве предикторов вошли формы циркуляции с предысторией в 1—4 года и индексы PDO и AMO. Статистические характеристики уравнений (1)—(3) приведены в табл. 3. Коэффициенты общей регрессии уравнений равны соответственно 0,94; 0,93 и 0,91, т.е. больше требуемого значения $> 0,6$.

Уровень значимости p -level для предикторов уравнений в большинстве случаев меньше 0,01, но для всех предикторов p -level меньше 0,05. Это указывает на то, что надежность расчета коэффициентов регрессии считается достаточной [17]. Критерий Фишера F на 2 порядка больше критического значения $F_{кр}$, то есть полученные уравнения являются адекватными, и результаты расчета удовлетворительно соответствуют исходным данным форм циркуляции атмосферы.

Таблица 3

Статистические характеристики уравнений (1)—(3).

Statistical characteristics of equations (1)—(3)

h<W>, уравнение (1): $R = 0,94$; $R^2 = 0,88$; $F = 140$; $F_{кр} = 6,0$; $\Delta W = 0,35$;			h<E>, уравнение (2): $R = 0,93$; $R^2 = 0,86$; $F = 120$; $F_{кр} = 6,0$; $\Delta W = 0,14$;			h<C>, уравнение (3): $R = 0,91$; $R^2 = 0,83$; $F = 310$; $F_{кр} = 8,0$; $\Delta W = 0,21$;		
Параметры	Вклад, %	p -level*	Параметры	Вклад, %	p -level*	Параметры	Вклад, %	p -level*
W(-1)	52	0,000	E(-1)	60	0,000	C(-1)	46	0,000
W(-3)	10	0,002	E(-3)	16	0,000	C(-3)	20	0,000
E(-4)	20	0,000	E(-4)	8	0,000	C(-4)	13	0,000
C(-4)	6	0,001	W(-3)	2	0,020	E(-1)	2	0,012
AMO(-13)	1	0,000	PDO(-2)	1	0,022	E(-4)	2	0,022
						AMO(-8)	1	0,012

Примечание: * означает значение p -критерия Стьюдента для i -той переменной в регрессионном уравнении.

Для линейного статистического уравнения дисперсия функции (в нашем случае предиктора) равна сумме произведений квадрата коэффициента пропорциональности в уравнении на дисперсию аргумента (в нашем случае предиктанта). Это правило позволяет вычислить вклад каждого предиктанта в дисперсию предиктора. Эти вклады рассчитаны для каждой переменной в уравнениях (1)–(3) и приведены в таблице в графе «Вклад, %».

Если убрать из уравнений (1)–(3) малые члены PDO(–2), АМО(–8), АМО(–13), то система уравнений (1)–(3) приобретает вид автоколебательной системы. Напомним, что автоколебания — это незатухающие колебания в нелинейной динамической системе, амплитуда и частота которых в течение длительного промежутка времени могут оставаться постоянными, не зависят в широких пределах от начальных условий и определяются свойствами самой системы [17]. При этом существенно то, что для восполнения потерь энергии должен существовать постоянный источник энергии, который в автономной системе, не имеющей сил, явно зависящих от времени, должен создавать силу, не являющуюся заданной функцией времени и определяемую самой системой. В определенной степени таким постоянным источником могут служить малые влияния индексов PDO(–2), АМО(–8), АМО(–13). Таким образом, в изменениях форм циркуляции наблюдаются свойства автоколебательной саморегулирующейся системы взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности [18].

Из табл. 3 следует, что дисперсия формы W связана с дисперсией предыстории $W(-1)$ и $W(-3)$ соответственно на 52 % и 10 %, с дисперсией предыстории форм $E(-4)$ на 20%, с $C(-4)$ связана лишь 6 % и слабо определяется дисперсией АМО. Дисперсия изменчивости формы $E(0)$ на 60 % связана с дисперсией предыстории $E(-1)$, на 16 % и 8% с дисперсией $E(-3)$ и $E(-4)$, а вклад формы $W(-3)$ составляет 2 %, и слабо определяется дисперсией АМО. Дисперсия изменчивости формы $C(0)$ суммарно на 79 % определяется предикторами $C(-1)$, $C(-3)$, $C(-4)$ и всего лишь на 4 % связана с дисперсией форм $E(-1)$ и $E(-4)$. Вклад дисперсии АМО в изменчивость формы циркуляции $C(0)$ мал.

Поскольку наша задача состояла в разработке статистических моделей по данным, осреднённым фильтром 3 года, то полученная система уравнений не позволяет установить импульс предикторов, который вызывает начало, развитие и деградацию форм циркуляции атмосферы. Вопрос причин зарождения, устойчивости, совместного существования и взаимного перехода форм циркуляции атмосферы (W , E , C) в масштабах синоптических и сезонных изменений еще нуждается в дальнейшем исследовании.

Статистические модели изменчивости форм циркуляции атмосферы с учетом астрогеофизических факторов

По мнению Дмитриева, Беязо, Гудошникова [11], изменчивость природных процессов в значительной мере определяется влиянием внешних сил. Ранее Виноградов и др. [19] отмечали, что на состояние общей циркуляции атмосферы влияют различные факторы как внутреннего, так и внешнего космико-географического

плана. С влиянием последних связывается частота и устойчивость формирования состояния циркуляции атмосферы.

Положения, высказанные как приведенными выше авторами, так и в работах [12, 14, 15, 20, 21, 22], подтверждаются результатами статистического анализа. Выполненный кросс-корреляционный анализ связи средних трехлетних форм W, E, C с рядом астрогеофизических характеристик (табл. 4) демонстрирует тесную корреляцию между формами циркуляции и астрогеофизическими характеристиками для большинства форм циркуляции. Выделяется большая корреляция форм циркуляции с продолжительностью суток, индексом lod , который характеризует скорость вращения Земли; изменением скорости вращения Земли (индекс $d lod$) и с аномалией силы притяжения между Землей и планетой Уран (F_{UR}).

Таблица 4

Корреляционная связь средних трехлетних форм W, E, C с астрогеофизическими характеристиками. (В скобках указан временной лаг запаздывания в годах форм циркуляции атмосферы по отношению астрогеофизическому индексу, горизонтальная черта означает отсутствие значимой корреляционной связи)

Correlation of three-year average forms of W, E, C with astrophysical characteristics. (The time lag in years of atmospheric circulation forms in relation to the astrophysical index is given in brackets, the horizontal line means the absence of a significant correlation)

	F_{UR}	F_{Sat}	J_s	SA	dSA	dQ	$d lod$	lod
W	0,81(–42)	0,23(–10)	–0,22(–23)	–0,26(–22)	0,20(–6)	—	–0,50(–3)	0,57(–21)
E	–0,65(–46)	—	–0,37(–26)	0,29(–21)	–0,26(–7)	0,21(–13)	0,37(–11)	0,55(–1), –0,34(–23)
C	–0,52(–28)	–0,35(–10)	–0,24(–17)	0,17(–7)	0,23(–8)	–0,22(–14)	0,52(–2)	–0,66(–10)

Связь колебаний скорости вращения Земли (индекс lod) с циркуляцией атмосферы представляется двоякой. На масштабах сезонных и межгодовых изменений отмечается, что колебания состояния атмосферы и океана являются причинами изменения скорости вращения Земли [23]. На масштабах внутривековых и вековых колебаний задающими считаются изменения скорости вращения Земли, которые влияют на процессы в природной среде Земли. По мнению Сидоренкова, многолетние колебания угловой скорости вращения Земли являются интегральным индексом глобальных климатических изменений [24]. Причины внутривековых и более продолжительных колебаний скорости Земли еще находятся в стадии изучения.

Кросс-корреляционный анализ связи трехлетних средних чисел форм циркуляции W, E, C с продолжительностью суток lod установил опережение изменений скорости вращения Земли по отношению внутривековых вариаций форм циркуляции C на 10 лет (табл. 2). То есть статистический анализ указывает на приоритет изменений скорости вращения Земли и вероятное ее влияние на форму циркуляции атмосферы C. Влияние изменчивости скорости вращения Земли на формы циркуляции атмосферы отмечал Сидоренков [23], который установил, что периоды ускорения вращения Земли совпадают с эпохами отрицательных аномалий формы циркуляции C и наоборот.

Влияние главных планет Урана, Сатурна и Юпитера в нашем исследовании моделируется аномалиями силы притяжения между Землей и планетами, соответственно переменными F_{Ur} , F_{Sat} , F_{Jup} . Можно предположить, что эти характеристики являются первым приближением учета влияния планет. Дмитриев, Беязо, Гудошников [11] установили связь координат полюса вращения Земли (X) и зональной формы циркуляции атмосферы (W) в зависимости от гелиодолгот Урана. Последнее соответствует изменению силы притяжения между Землей и Ураном F_{Ur} в зависимости от расстояния между ними. В указанной монографии также приводится связь изменений гидрометеорологических характеристик с положением планеты Сатурн на его орбите, что сопряжено с изменением силы притяжения между Землей и Сатурном F_{Sat} . Как видно из табл. 4, коэффициенты корреляции между формами циркуляции и индексом F_{Ur} довольно высокие, а с индексом F_{Sat} они значительно меньше. Корреляция аномалий силы притяжения между Землей и Юпитером F_{Jup} оказалась ниже уровня значимости (в табл. 2 эти данные не приведены). Возможно, на это повлияла операция сглаживания трехлетним фильтром, учитывая, что период обращения Юпитера равен 12 лет, а масштаб осреднения составлял 3 года.

Авторами монографии [11] продемонстрирована сопряженность изменения солнечного ветра и скорости вращения Земли в координатах гелиодолгот Юпитера, сопряженность солнечной активности и температуры воздуха в Западной Арктике по разностям гелиодолгот Урана и Юпитера и др. Влияние солнечной активности на циркуляцию атмосферы не вызывает сомнений, дискуссии продолжаются только о механизмах воздействия солнечной радиации на атмосферу Земли. Укажем, что Федоров [13] в колебаниях поступления солнечной радиации к Земле выделяет два механизма. Один связан с изменением солнечной активности Солнца SA , в качестве показателя которого чаще всего используют числа Вольфа. Другой механизм связан с изменением расстояния между Землей и Солнцем, наклоном оси вращения Земли, которые вызывают изменения в инсоляции Солнца Q , приходящей на внешнюю границу атмосферы.

В статье нами используется градиент инсоляции dQ (инсоляционная контрастность), в качестве которой была вычислена разность инсоляции в широтных зонах $45-65^\circ$ и $65-85^\circ$ с.ш., обозначенная индексом $dQ = Q_{45-65} - Q_{65-85}$. В работе Федорова и Гребенщикова [14] установлена статистическая связь глобальной приповерхностной температуры воздуха с величиной инсоляционной контрастности. По мнению Davis and Brewer [22], контрастность температуры между севером и югом управляет атмосферной циркуляцией Земли и ветровой циркуляцией океана. Коэффициенты корреляции между формами циркуляции и индексом dQ невысокие в пределах $0,21-0,22$ с опережением на $13-14$ лет (табл. 2).

Влияние изменений момента вращения системы Солнце–Земля относительно центра масс Солнечной системы J_s описывается Шерстюковым [15] следующим образом. Поскольку за счет больших планет возникает дисимметрия Солнечной системы, то возникают неучтенные составляющие в движении Земли, связанные с перемещением самого Солнца в космическом пространстве и перемещением Земли вместе с Солнцем. Появление в связи с диссимметрией Солнечной системы

неучтенных движений Земли и, как следствие, индукция при этом неучтенных сил, которые могут регулировать циркуляцию вод океана, теплообмен в системе океан–атмосфера и межширотный теплообмен [15].

Результаты статистического анализа, демонстрирующие сопряженность долгопериодных изменений форм циркуляции атмосферы с рядом астрогеофизических характеристик, явились основанием для построения статистических моделей долгопериодной изменчивости форм циркуляции, в которых в качестве предикторов включены астрогеофизические характеристики. С помощью пошаговой процедуры множественной линейной регрессии методом последовательного включения переменных [16] были получены оптимальные статистические модели долговременных колебаний нормированных средних трехлетних скользящих значений аномалий форм циркуляции за период с 1921 г. по 2020 г.:

$$k\langle W \rangle = 0,88F_{Ur}(-44) - 0,16Js(-23) + 0,29dSA(-8) - 0,19d\text{lod}(-2) - 0,16\text{lod}(-24) - 0,13SA(-21); \quad (4)$$

$$k\langle E \rangle = -1,16F_{Ur}(-43) - 0,48Js(-8) + 0,34\Delta Q(-13) - 0,34\Delta SA(-8) - 0,39d\text{lod}(-7) + 0,52\text{lod}(-23) + 0,26SA(-21); \quad (5)$$

$$k\langle C \rangle = 0,45F_{Ur}(-28) - 0,37Js(-18) - 0,27dQ(-13) - 0,90\text{lod}(-12) + 0,32*d\text{lod}(-1) + 0,002SA(-6). \quad (6)$$

В уравнениях (4)–(6) введены следующие обозначения модельных форм циркуляции $k\langle W \rangle$, $k\langle E \rangle$, $k\langle C \rangle$ для отличия их от наблюдаемых форм циркуляции атмосферы. Статистические характеристики уравнений (4)–(6) приведены в табл. 5. Коэффициенты детерминации уравнений, которые равны соответственно 0,81; 0,76; 0,65 и превышают критические значения $R_{кр} = 0,5–0,6$ [16], а уровень значимости p -level предикторов меньше 0,01, за исключением предиктора $SA(-6)$. Для этого индекса p -level больше 0,01, но меньше критического 0,05. Критерий Фишера F намного больше критического значения $F_{кр}$. Таким образом, из анализа статистических критериев следует, что уравнения (4)–(6) статистически значимы и адекватны, т. е. рассчитанные по уравнениям значения хорошо соответствуют исходным данным форм циркуляции атмосферы. Следовательно, между долговременной изменчивостью форм циркуляции атмосферы и изменчивостью астрогеофизических факторов установлена статистическая связь.

Для уравнений (4)–(6) был подсчитан вклад каждого предиктора в дисперсию форм циркуляции. Эти вклады в процентах приведены в табл. 3 для каждого предиктора. Как видим из полученных оценок, доминирующий вклад в дисперсию изменчивости форм циркуляции $\langle W \rangle$ и $\langle E \rangle$ приходится на изменчивость аномалии силы притяжения между Землей и планетой Уран, (F_{Ur}).

Вклад изменчивости аномалии силы притяжения между Землей и планетой Уран (F_{Ur}) в вариации формы C меньше, чем для форм $\langle W \rangle$ и $\langle E \rangle$ (табл. 5), а доминирующий вклад в изменчивости формы циркуляции $\langle C \rangle$ приходится на аномалию скорости вращения Земли (39 %, индекс $\text{lod}(-12)$). Дополнительно значительный вклад вносит изменчивость скорости вращения Земли (5 %, индекс $d\text{lod}(-1)$). Как отмечалось выше, по Сидоренкову, периоды ускорения вращения

Земли (в нашем случае уменьшение $d\text{lod}$) совпадают с эпохами отрицательных аномалий формы циркуляции C . Установленная им закономерность для формы циркуляции C также следует из уравнения (6). Действительно, при ускорении вращения Земли, что в нашем случае соответствует отрицательному значению $d\text{lod}$, парциальный вклад предиктора $d\text{lod}(-2)$, в соответствии с уравнением (6), способствует увеличению отрицательных аномалий формы циркуляции атмосферы C .

Таблица 5

Статистические характеристики уравнений (4—6)

Statistical characteristics of equations (4)—(6)

k<W>: уравнение (4) $R = 0,90$; $R^2 = 0,81$; $F = 101$; $F_{\text{кр}} = 5$; $\Delta W = 0,44$; $\sigma_w = 1,00$			k<E>: уравнение (5) $R = 0,89$; $R^2 = 0,79$; $F = 50$; $F_{\text{кр}} = 8$; $\Delta E = 0,47$; $\sigma_E = 1,00$			k<C>: уравнение (6) $R = 0,80$; $R^2 = 0,64$; $F = 26$; $F_{\text{кр}} = 7$; $\Delta C = 0,61$; $\sigma_c = 1,00$		
Параметры	Вклад, %	p -level	Параметры	Вклад, %	p -level	Параметры	Вклад, %	p -level
$F_{\text{Ur}}(-44)$	65	0,000	$F_{\text{Ur}}(-43)$	46	0,000	$F_{\text{Ur}}(-28)$	10	0,000
$J_s(-23)$	2	0,001	$J_s(-8)$	8	0,000	$J_s_y(-18)$	7	0,000
$dSA(-8)$	7	0,000	$dSA(-8)$	4	0,000	$dQ(-13)$	3	0,001
$SA(-21)$	1	0,004	$SA(-21)$	2	0,000	$SA(-6)$	0,002	0,039
$d\text{lod}(-2)$	3	0,000	$d\text{lod}(-7)$	5	0,000	$d\text{lod}(-1)$	5	0,000
$\text{lod}(-24)$	2	0,001	$dQ(-13)$	4	0,000	$\text{lod}(-12)$	39	0,000
			$\text{lod}(-23)$	9				

Вклад в долговременные изменения аномалий числа форм циркуляции атмосферы $\langle W \rangle$, $\langle E \rangle$, $\langle C \rangle$ астрогеофизических параметров dQ (инсоляционная контрастность), $dSA(-8)$ (разность поступление от Солнца энергии в 0-й и 10-й годы), интенсивности солнечной активности (числа Вольфа, SA) невелик и колеблется от 0,002 до 7 %. Вклад изменчивости аномалий среднегодового суммарного момента инерции вращения больших планет относительно центра масс Солнечной системы J_s в долгопериодную изменчивость форм циркуляции колеблется от 2 до 8 % (табл. 5).

Опыт предвычисления долгопериодных изменений форм циркуляции атмосферы

Высокие общие коэффициенты корреляции и коэффициенты детерминации разработанных статистических моделей (1)—(6) позволяют полагать, что разработанные уравнения на статистическом уровне правдоподобно описывают долговременные изменения форм циркуляции атмосферы в западной части Арктики в диагностическом режиме. То есть уравнения можно использовать в расчетах аномалий трехлетних средних скользящих величин форм циркуляции атмосферы для периодов, для которых известны значения предикторов, а расчеты выполняются для определения недостающих значений предиктантов.

В тоже время встает вопрос о возможности использования статистических моделей долговременных изменений циркуляции атмосферы для предвычисления форм циркуляции атмосферы для Арктики. Такой расчет был выполнен за период

с 1921 г. по 2021 г. по зависимым предикторам и осуществлена экстраполяция значений форм циркуляции атмосферы на период с 2022 г. по 2030 г. по независимым предикторам.

Расчеты по уравнениям (1)—(3) производились следующим образом. На первом шаге (2022 г.) по уравнениям рассчитывались величины средних трехлетних скользящих значений W , E , C . На втором временном шаге вычисленные значения форм циркуляции использовались в качестве предыстории $W(-1)$, $E(-1)$, $C(-1)$ с корректировкой предыстории на следующие три года. Значения предикторов АМО, PDO и L_w для периода с 1920 г. по 2021 г. использовались фактические, а для периода с 2022 г. по 2030 г. предвычислялись по формулам, полученным эмпирическим путем полиномами шестой степени временных рядов за период с 1920 г. по 2021 г.

Расчеты аномалий форм циркуляции по уравнениям (4—6) были выполнены с использованием известных предикторов (1920—2021 гг.) и предвычисленных астрогеофизических предикторов для периода с 2022 г. по 2030 г. Значения индекса dQ были вычислены по данным Костина и Федорова /<http://www.solar-climate.com/en/ensc/basard.htm/>, а индекса J_s — по данным Шерстюкова [15]. Значения индексов lod , $d lod$ и dWs были рассчитаны по данным прогнозов [25, 26].

На рис. 3 приведены фактические аномалии форм циркуляции атмосферы W , E (временной ряд 1921—2022 г.) и расчетные $k\langle W \rangle$, $k\langle E \rangle$, $h\langle W \rangle$, $h\langle E \rangle$ до 2030 г., а на рис. 4 приведены фактические аномалии форм циркуляции атмосферы $W + E$, C (временной ряд 1921—2022 г.) и расчетные $k\langle C \rangle$, $k\langle W + E \rangle$, $h\langle C \rangle$, $h\langle W + E \rangle$ до 2030 г. с использованием астрогеофизических и гидрометеорологических предикторов.

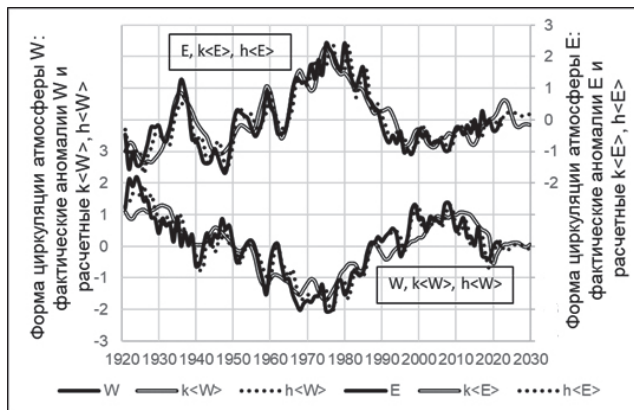


Рис. 3. Фактические аномалии форм циркуляции атмосферы W , E (временной ряд 1921—2022 г.) и расчетные до 2030 г. с использованием астрогеофизических предикторов $k\langle W \rangle$, $k\langle E \rangle$ и гидрометеорологических предикторов $h\langle W \rangle$, $h\langle E \rangle$.

Fig. 3. Actual anomalies of atmospheric circulation forms W , E (time series 1921—2022) and calculated up to 2030 using astrophysical predictors $k\langle W \rangle$, $k\langle E \rangle$ and hydrometeorological predictors $h\langle W \rangle$, $h\langle E \rangle$.

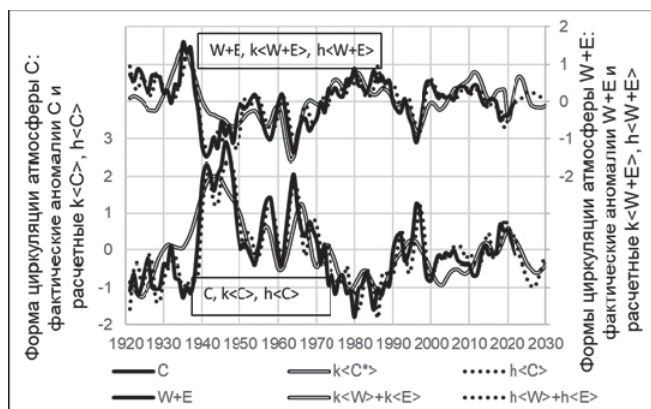


Рис. 4. Фактические аномалии форм циркуляции атмосферы W + E, C (временной ряд 1921—2022 г.) и расчетные до 2030 г. с использованием астрогеофизических предикторов $k\langle W + E \rangle$, $k\langle C \rangle$ и гидрометеорологических предикторов $h\langle W + E \rangle$, $h\langle C \rangle$.

Fig. 4. Actual anomalies of atmospheric circulation patterns W + E, C (time series 1921—2022) and calculated up to 2030 using astrogeophysical predictors $k\langle W + E \rangle$, $k\langle C \rangle$ and hydrometeorological predictors $h\langle W + E \rangle$, $h\langle C \rangle$.

Сопоставление фактических и рассчитанных по зависимым предикторам значений форм циркуляции на временном интервале 1921—2020 гг. свидетельствует о сопряженном описании долговременных изменений форм циркуляции как уравнениями (1)—(3) с гидрометеорологическими предикторами, так с уравнениями (4)—(6) с астрогеофизическими предикторами, что также следует из статистических оценок в табл. 4 и табл. 5. При этом коэффициенты корреляции между парами рядов ($k\langle W \rangle - h\langle W \rangle$), ($k\langle E \rangle - h\langle E \rangle$), ($k\langle C \rangle - h\langle C \rangle$) равны соответственно 0,86; 0,89; 0,73. А среднеквадратические разности между расчетами с использованием гидрометеорологических и астрогеофизических предикторов составили для W, E, C составили соответственно 0,47; 0,42; 0,66.

Анализ расчетов для временного интервала 2021—2030 гг. с использованием независимых предикторов позволяет сделать важный вывод. Предвычисления форм циркуляции атмосферы моделями (1)—(3) с независимыми гидрометеорологическими предикторами и моделями (4)—(6) с независимыми астрогеофизическими предикторами дают близкие результаты. Среднеквадратические разности между расчетами с использованием независимых гидрометеорологических и астрогеофизических предикторов для W, E, C составили для всех 0,40 или 40 % по отношению к среднеквадратическому (нормированному) отклонению фактических изменений W, E, C. Таким образом, обе группы уравнений адекватно описывают тенденции долговременных изменений форм циркуляции атмосферы и могут служить методической основой для разработки сверхдолгосрочного прогноза долговременных изменений с использованием как гидрометеорологических и астрогеофизических предикторов, так и их

комбинации. Но вопрос об использовании статистических моделей для целей сверхдолгосрочного прогноза форм циркуляции атмосферы в Арктике требует дополнительного анализа. Важнейшими этапами в этом направлении является исследование устойчивости статистических уравнений вне ряда предикторов, которые участвовали в разработке этих уравнений (в работе [27] такая процедура была использована при описании долговременной изменчивости температуры воздуха в Арктике), а также развитие физической интерпретации влияния предикторов.

Заключение

Выполнен анализ статистической структуры долговременных (более 1—3 лет) изменений форм циркуляции по классификации Вангенгейма. Установлено, что наибольший линейный тренд имеют западная W и восточная E формы циркуляции атмосферы (при этом знак трендов у них противоположный), а меридиональная форма C имеет слабый отрицательный тренд.

Спектральный анализ демонстрирует в межгодовых колебаниях форм циркуляции W, E и C присутствуют цикличности с периодом 2—3 года и 5—6 лет и 7—9 лет. Наибольшие амплитуды приходятся на цикличности 20—25 лет, 40—42 года, и по нелинейному тренду можно предположить присутствие цикличности с периодом 80—100 лет в колебаниях форм W и E, а в изменениях формы C отмечается цикличность с периодом около 60—80 лет.

Установлена статистическая связь среднегодовых форм W, E и C с их предысторией: для W связь с прошлыми уровнями временных рядов может достигать 11—12 лет, для E может достигать 10 лет, а для формы C — до 6—7 лет. Статистическая связь средней трехлетней формы W с предыдущими значениями (предыстория) временного ряда отмечается до 6 лет, формы E может достигать 4—5 лет, а связь формы C с предысторией может сохраняться только до 2—3 лет.

С помощью корреляционного анализа выявлено, что западная форма циркуляции $W(0)$ статистически тесно связана с предысторией ее развития $W(-1)$ — $W(-4)$ и с восточной формой $E(0)$ и ее предысторией. Но с меридиональной формой $C(0)$ и ее предысторией статистическая связь очень слабая, ниже уровня значимости. Восточная форма циркуляции $E(0)$ статистически тесно связана с ее предысторией и западной формой циркуляции $W(0)$ и ее предысторией. Но корреляция формы $E(0)$ с меридиональной формой $C(0)$ слабая и даже ниже уровня значимости. Статистическая связь меридиональной форма циркуляции $C(0)$ с предысторией достаточно быстро убывает, коэффициент корреляции с $C(-3)$ уже меньше 0,6. Изменения $C(0)$ практически не коррелирует с западной формой $W(0)$ и ее предысторией, а с восточной формой $E(0)$ и ее предысторией форма циркуляции $C(0)$ статистически связана коэффициентами корреляции меньше 0,5.

Разработаны статистические модели долговременных колебаний нормированных средних трехлетних скользящих значений аномалий форм циркуляции для периода с 1921 г. по 2020 г. с гидрометеорологическими и астрогеофизическими предикторами, а также получены оценки вклада каждого предиктора в дисперсию

предиктантов. Соответствие рассчитанных по уравнениям форм циркуляции атмосферы фактическим значениям позволяет сделать вывод о возможности использовать разработанные модели для диагностических расчетов форм циркуляции атмосферы по типизации Вангенгейма.

Выполнены опытные расчеты средних трехлетних скользящих значений форм циркуляции атмосферы на период до 2030 г. Предвычисление по статистическим моделям с гидрометеорологическими предикторами и по моделям с астрогеофизическими предикторами показывает хорошее совпадение, что позволяет использовать оба подхода для расчета долгопериодной изменчивости форм циркуляции атмосферы Вангенгейма. Но при разработке метода сверхдолгосрочного прогноза форм циркуляции атмосферы на основе статистических моделей важно испытать, насколько модели теряют точность при переходе к расчетам по независимым данным, т.е. исследовать устойчивость статистических уравнений вне ряда предикторов, которые участвовали в разработке этих уравнений. Такая процедура была использована при описании долговременной изменчивости температуры воздуха в Арктике в работе [27]. Не менее важным этапом при разработке метода сверхдолгосрочного прогноза является выявление физических механизмов влияния предикторов и описание их прямого или косвенного воздействия на изменчивость форм циркуляции атмосферы.

Указанные процедуры позволяют использовать предложенные выше подходы статистического описания долговременных изменений форм циркуляции (с использованием как гидрометеорологических и астрогеофизических предикторов, так и их комбинации) для разработки сверхдолгосрочного (более года) расчета и прогноза форм циркуляции атмосферы по классификации Вангенгейма для Арктики.

Список литературы

1. Иванов В. В., Алексеев Г. А. Атмосферная циркуляция и развитие атмосферных процессов в морской Арктике // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 20—34.
2. Алексеев Г. В. Современное состояние климатической системы морской Арктики // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 10—19.
3. Гудкович З. М., Карклин В. П., Фролов И. Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова, Евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. 2005. №6. С. 5—14.
4. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова Евразийского шельфа. СПб: Наука. 2007. 135 с.
5. Юлин А. В. Климатическая изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане и российских арктических морях // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 132—141.
6. Аксенов П. В., Иванов В. В. Атлантификация как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Том 64. № 1. С. 42—54. DOI: 10.20758/0555-2648-2018-64-1-42-54
7. Тимохов Л. А., Блошкина Е. В. Термохалинная структура арктических морей в 1986—2015 гг. // Моря российской Арктики в современных климатических условиях / Под ред. И. М. Ашика, СПб: ААНИИ, 2021. С. 204—250.

8. Иванов В. В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 407—434. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407—434.
9. Scafetta N. Climate Change and Its causes: A Discussion about Some Key Issues // La Chimica e l'Industria. 2010. No. 1. P. 70—75.
10. Вангенгейм Г. Я. Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики // Труды ААНИИ, 1952, Т. 34. 66 с.
11. Дмитриев А. А., Белязо В. А., Гудошников Ю. П. Ритмические колебания земных природных процессов и их гравитационная обусловленность. СПб: Издательство Политехнического университета. 2011. 231 с.
12. Дыдина Л. А. Макроциркуляционный метод прогнозов погоды на 3—10 суток для Арктики. Л., Гидрометеиздат, 1964. 391 с.
13. Федоров В. М. Солнечная радиация и климат Земли. М.: ФИЗМАТГИЗ, 2018. 232 с.
14. Федоров В. М., Гребенников П. Б. Инсоляционная контрастность Земли и изменение площади морских льдов в Северном полушарии // Арктика: экология и экономика. 2018. № 4(32). С. 86—94. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-86-94.
15. Шерстюков Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск, 2021. 221 с.
16. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск, Изд-во ПИНРО, 2003. 129 с.
17. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. 2 изд., М., 1959. 916 с.
18. Николаев Ю. В. Роль крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в формировании аномалий погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 52 с.
19. Виноградов Н. Д., Дмитриев А. А., Болотинская М. С. и др. Влияние изменения циркуляции атмосферы на климат // Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б. А. Крутских. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. С. 62—94.
20. Слепцов-Шевлевич Б. А., Бояринов А. М. Солнечный ветер, вращение Земли и климат. СПб: 2002. 159 с.
21. Логинов В. Ф. Космические факторы климатических изменений. Минск, 2020. 168 с.
22. Davis B. A. S., S. Brewer. A unified approach to orbital, solar, and lunar forcing based on the Earth's latitudinal insolation/temperature gradient. 2011.
23. Сидоренков Н. С. Небесно-механические причины изменения погоды и климата // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 15. №3. С. 5—26.
24. Сидоренков Н. С. Физика неустойчивости вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 380 с.
25. Solar cycle progression. Space weather prediction center, NOAA, 2022. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
26. Earth Rotation — the Change in the Length of Day and Delta T.pdf. HM Nautical Almanac Office, <https://astro.ukho.gov.uk/>.
27. Тимохов Л. А., Малинин В. Н., Иванов В. В. Связь долговременных изменений температуры воздуха в Арктике с колебаниями гидрометеорологических и астрогеофизических факторов // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 451—473.

References

1. Ivanov V. V., Alekseenkov G. A. Atmospheric circulation and development of atmospheric processes in the marine Arctic. *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions*. /Ed. I. M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021: (20—34). (In Russ.).
2. Alekseev G. V. Current state of the climate system of the marine Arctic. *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions*. /Ed. I. M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021: (10—19). (In Russ.).
3. Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Frolov I. E. Intra-century changes in climate, ice cover area, Eurasian Arctic seas and their possible causes. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2005; (6): (5—14). (In Russ.).

4. Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P. et al. *Nauchnyye issledovaniya v Arktike. T. 2. Klimaticheskiye izmeneniya ledyanogo pokrova Yevraziyskogo shel'fa = Scientific research in the Arctic. Vol. 2. Climatic changes in the ice cover of the Eurasian shelf.* St. Petersburg: Nauka. 2007: 135 p. (In Russ.).
5. Yulin A. V. Climatic variability of ice area in the Arctic Ocean and Russian Arctic seas. In: *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions.* /Ed. I. M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021; (132—141). (In Russ.).
6. Aksenov P. V., Ivanov V. V. “Atlantification” as a probable reason for the reduction of sea ice in the Nansen basin in the winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic.* 2018; 64(1): (42—54). DOI: 10.20758/0555-2648-2018-64-1-42-54 (In Russ.).
7. Timokhov L. A., Bloshkina E. V. Thermohaline structure of the Arctic seas in 1986—2015. In: *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions.* Ed. I. M. Ashik. St. Petersburg: AARI. 2021; (204—250). (In Russ.).
8. Ivanov V. V. Present changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with reduction of the sea ice cover. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology.* 2021; (64): (407—434). doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-407—434. (In Russ.).
9. Scafetta N. Climate Change and Its Causes, a Discussion about Some Key Issues, SPPI Original Paper, Science and Public Policy Institute, Haymarket, 2010; 1—56.
10. Vangengeim G. Ya. Fundamentals of the macrocirculation method of long-term meteorological forecasts for the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic.* 1952, (34); 66 p. (In Russ.).
11. Dmitriev A. A., Belyazo V. A., Gudoshnikov Yu. P. *Ritmicheskiye kolebaniya zemnykh prirodnykh protsessov i ikh gravitatsionnaya obuslovlennost = Rhythmic oscillations of natural processes of the earth and their gravitational determinacy.* St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. 2011: 231 p. (In Russ.).
12. Dydina L. A. *Makrotsirkulyatsionnyy metod prognozov pogody na 3—10 sutok dlya Arktiki = Macro-circulation method of weather forecasts for 3—10 days for the Arctic.* Leningrad, Gidrometeoizdat, 1964: 391 p.
13. Fedorov V. M. *Solnechnaya radiatsiya i klimat Zemli = Solar radiation and the Earth's climate.* Moscow: Fizmatgiz, 2018: 232 p. (In Russ.).
14. Fedorov V. M., Grebennikov P. B. Insolation contrast of the Earth and changes in the area of sea ice in the Northern Hemisphere. *Arctic: ecology and economics.* 2018; 4(32): (86—94). DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-86-94. (In Russ.).
15. Sherstyukov B. G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'niye svyazi, prognozy = Vibrational climate system, resonances, long-distance communications, forecasts.* Obninsk: RIHMI-WDC. 2021: 222 p. (In Russ.).
16. Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Fiziko-statisticheskiy metod prognoza okeanologicheskikh kharakteristik (na primere Severo-Yevropeyskogo basseyna) = Physical-statistical method of forecasting oceanographic characteristics (on the example of the North European basin).* Murmansk, PINRO Publishing House. 2003: 129 p. (In Russ.).
17. Andronov A. A., Vitt A. A., Khaykin S. E. *Teoriya kolebaniy = Theory of Oscillations.* 2nd ed., Moscow, 1959, 916 p. (In Russ.).
18. Nikolayev YU. V. *Rol' krupnomasshtabnogo vzaimodeystviya okeana i atmosfery v formirovaniy anomalii pogody = The Role of Large-Scale Interaction of the Ocean and Atmosphere in the Formation of Weather Anomalies.* Leningrad: Gidrometeoizdat. 1981: 52 p. (In Russ.).
19. Vinogradov N. D., Dmitriev A. A., Bolotinskaya M. S. et al. The influence of atmospheric circulation changes on climate. In: *Climatic regime of the Arctic at the turn of the 20th and 21st centuries.* Ed. B. A. Krutskikh. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991; (62—94). (In Russ.).
20. Slepsov-Shevlevich B. A., Boyarinov A. M. *Solnechnyy veter, vrashcheniye Zemli i klimat = Solar wind, Earth rotation and climate.* St. Petersburg: 2002: 159 p. (In Russ.).
21. Loginov V. F. Space factors of climate change. Minsk, 2020. 168 p.
22. Davis B. A.S., Brewer S. A unified approach to orbital, solar, and lunar forcing based on the Earth's latitudinal insolation/temperature gradient. *Quaternary Science Reviews,* 2011. 30(15—16): 1861—1874.
23. Sidorenkov N. S. Celestial-mechanical causes of weather and climate change. *Geophysical processes and the biosphere,* 2015. 15(3): (5—26). (In Russ.).

24. Sidorenkov N. S. Physics of instability of the Earth's rotation. Moscow: Fizmatlit, 2002. 380 p. (In Russ.).
25. Solar cycle progression. Space weather prediction center, NOAA, 2022. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>.
26. Earth Rotation — the Change in the Length of Day and Delta T.pdf. HM Nautical Almanac Office, <https://astro.ukho.gov.uk/>.
27. Timokhov L. A., Malinin V. N., Ivanov V. V. The relationship of long-term changes in air temperature in the Arctic with fluctuations in hydrometeorological and astrogeophysical factors. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):451—473 doi:10.33933/2713-3001-2024-76-451-473. (In Russ.).

Информация об авторах

Тимохов Леонид Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела океанологии, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, ltim@aari.ru.

Иванов Владимир Васильевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией долгосрочных метеорологических прогнозов отдела ледового режима и прогнозов, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, v_ivanov@aari.ru.

Informations about authors

Timokhov L. A., Doctor of Physical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Department of Oceanology, Arctic and Antarctic Research Institute.

Ivanov V. V., Candidate of Geography Sciences, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Long-term Meteorological Forecasts of the Department of Ice Regime and Forecasts, Arctic and Antarctic Research Institute.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 22.05.2025

Принята к печати после доработки 20.08.2025

The article was received on 22.05.2025

The article was accepted after revision on 20.08.2025