

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-3-114-132>

УДК 551.513.3

Методика и результаты анализа пространственной структуры Сибирского антициклона

К.А. Сумерова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
sum-ksusha@yandex.ru*

Разработана методика количественной оценки пространственной структуры Сибирского антициклона (СА) на основе расчёта центра тяжести поля положительных аномалий приземного давления. На ее основе и с использованием данных ERA5 рассчитаны за период 1950–2025 гг. положение центра тяжести СА, радиус инерции (мера компактности) и суммарная интенсивность. Показано, что мощные антициклоны в 93.8 % случаев локализованы в пределах 40–60° с. ш., 80–120° в. д., тогда как слабые — лишь в 30.4 %. Метод верифицирован по полю плотности воздуха (расхождения средних положений $\leq 0.5^\circ$). Количественно определены характеристики сезонной и межгодовой изменчивости СА. Спектральный анализ основных параметров СА выявил значимые периоды в изменчивости: 9.5 лет (долгота центра) и 2.5 года (широта центра), которые могут быть связаны с 11-летним циклом солнечной активности и квазидвухлетней осцилляцией (QBO). Разработанная методика позволяет проводить мониторинг параметров СА и применима для диагностики ожидаемого положения и интенсивности антициклона по прогностическим полям моделей.

Ключевые слова: Сибирский антициклон, центр тяжести, радиус инерции, эксцентриситет, SHI, спектральный анализ, арктическое усиление

Methods and Results of the Analysis of the Spatial Structure of the Siberian High

K.A. Sumerova

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
sum-ksusha@yandex.ru*

A methodology has been developed for quantitative assessment of the spatial structure of the Siberian High (SH) based on calculating the center of gravity of the positive sea level pressure anomaly field. On its basis and using ERA5 data, the position of the SH center of gravity, the radius of inertia (a measure of compactness), and the total intensity were calculated for the period of 1950–2025. It is shown that powerful anticyclones are localized within 40–60° N, 80–120° E in 93.8% of cases, whereas the respective value for weak ones is only 30.4%. The method was verified by the air density field (differences in mean positions $\leq 0.5^\circ$). The characteristics of seasonal and interannual variability of the SH have been quantitatively determined. A spectral analysis of the main SH parameters revealed significant periods in the variability: 9.5 years (longitude of the center) and 2.5 years (latitude of the center), which may be associated with the 11-year solar activity cycle and the quasi-biennial oscillation (QBO). The developed methodology allows monitoring the SH parameters and is applicable for diagnosing an expected position and intensity of the anticyclone from model forecast fields.

Keywords: Siberian High, center of gravity, radius of inertia, eccentricity, SHI, spectral analysis, Arctic amplification

Введение

Для характеристики Сибирского антициклона используется ряд количественных критериев, основанных преимущественно на анализе поля приземного атмосферного давления. В первую очередь определяются его интенсивность. Интенсивность чаще всего оценивается по среднему или максимальному значению давления в пределах области, характерной для Сибирского антициклона (например, 40–65° с. ш., 80–120° в. д.). Как отмечается в работах [13, 19], площадные индексы, усредненные по области, являются более надежными и информативными по сравнению с одноточечными значениями, применявшимися, в частности, в исследованиях [16, 20]. Данный подход позволяет количественно оценить интенсивность барического поля, однако не дает информации о пространственной динамике ядра антициклона – его смещениях, изменении формы и степени компактности. Для восполнения этого недостатка в работе предложен подход, основанный на понятии центра тяжести поля аномалий приземного давления. По аналогии с механикой, где центр тяжести системы материальных точек определяется как среднее взвешенное их положений, здесь в качестве «веса» (аналога силы) используется величина положительной аномалии давления в каждой ячейке регулярной сетки. Такой подход позволяет не только определить местоположение «эпицентра» антициклона, но и рассчитать ряд дополнительных характеристик: суммарную интенсивность (интеграл аномалий), радиус инерции (меру компактности), а также оценить изменчивость этих параметров во времени.

Принципиальным преимуществом данного подхода является его физическая обоснованность: центр тяжести вычисляется на основе распределения аномалий давления в расширенной области (30–70° с. ш., 60–140° в. д.), что позволяет объективно локализовать ядро антициклона без привязки к заранее заданному фиксированному прямоугольнику, используемому в традиционном площадном индексе SHI. Кроме того, метод позволяет отслеживать смещения ядра антициклона даже в тех случаях, когда оно выходит за пределы традиционной области расчета SHI, что особенно важно для анализа слабых и неустойчивых антициклонов. В работе выполнена количественная оценка формы Сибирского антициклона (эксцентриситет и ориентация) на основе многолетних данных.

Впервые выполнен комплексный анализ положения, компактности и сезонной динамики центра тяжести Сибирского антициклона на данных аномалий приземного давления и проведены сравнения с расчетами по плотности воздуха за 76-летний период.

1. Параметры и методы расчета

1.1. Исходные данные и область расчета

В работе использованы данные реанализа ERA5 [15] за период январь 1950 г. – февраль 2026 г. (914 месяцев). Пространственное разрешение составляет 2.5×2.5°. Расчет центра тяжести по полю давления выполнен по месячным аномалиям приземного давления относительно климатической

нормы 1991–2020 гг. Для расчета центра тяжести по полю плотности воздуха использованы абсолютные значения приземного давления и приземной температуры из того же реанализа. Плотность вычислялась по уравнению состояния сухого воздуха, после чего рассчитывались ее аномалии относительно климатологии 1991–2020 гг. Для учета возможных смещений центра тяжести за пределы классической области расчета SHI (40–60° с. ш., 80–120° в. д.) площадь была расширена до 30–70° с. ш. и 60–140° в. д. (всего 561 точка).

1.2. Расчет центра тяжести

В механике центр тяжести системы материальных точек определяется как геометрическая точка, положение которой характеризует распределение сил тяжести в системе. Ее координаты вычисляются как средневзвешенное положение всех точек, где весами выступают их силы тяжести (пропорциональные массам) [3, 6, 9].

В данной работе эта концепция адаптирована для метеорологии: в качестве «веса» (аналога силы) используется величина положительной аномалии давления в каждой ячейке сетки. Рассчитанные по аналогичным формулам величины lon_{cg} и lat_{cg} представляют собой координаты центра тяжести поля положительных аномалий давления и характеризуют положение «эпицентра» Сибирского антициклона в каждый месяц. Пусть ΔP_{ij} – величина положительной аномалии давления ($\Delta P_{ij} > 0$) в узле регулярной сетки с индексами i (широта) и j (долгота), а lon_i и lat_i — соответствующие значения долготы и широты. Тогда координаты центра тяжести антициклона вычисляются по формулам:

$$lon_{cg} = \frac{\sum_{i,j} \Delta P_{ij} \cdot lon_j}{\sum_{i,j} \Delta P_{ij}}, \quad lat_{cg} = \frac{\sum_{i,j} \Delta P_{ij} \cdot lat_i}{\sum_{i,j} \Delta P_{ij}},$$

где ΔP_{ij} – аномалия давления в точке с индексами i (широта) и j (долгота).

Суммирование ведется по всем узлам, для которых $\Delta P_{ij} > 0$, что позволяет исключить влияние областей с пониженным давлением и сосредоточиться исключительно на антициклонической составляющей барического поля.

Полученные величины lon_{cg} и lat_{cg} интерпретируются как координаты «эпицентра» Сибирского антициклона в каждый рассматриваемый месяц. В отличие от традиционного подхода, ориентированного на поиск точки абсолютного максимума давления, центр тяжести дает более надежную характеристику положения антициклона, особенно в случаях многоцентровой структуры или размытого максимума.

1.3. Радиус инерции

Для количественной оценки компактности антициклона используется радиус инерции – средневзвешенное расстояние всех точек с положительными аномалиями от центра тяжести:

$$R = \frac{\sum_{i,j} \Delta P_{ij} d_{ij}}{\sum_{i,j} \Delta P_{ij}},$$

где d_{ij} – расстояние от точки с координатами lon_j, lat_i до центра тяжести lon_{cg} и lat_{cg} , вычисляемое по формуле евклидова расстояния:

$$d_{ij} = \sqrt{(lon_j - lon_{cg})^2 + (lat_i - lat_{cg})^2}$$

или

$$R = \frac{\sum_{i,j} \Delta P_{ij} \sqrt{(lon_j - lon_{cg})^2 + (lat_i - lat_{cg})^2}}{\sum_{i,j} \Delta P_{ij}},$$

где числитель – сумма расстояний от каждой точки до центра, умноженных на величину аномалии в этой точке, а знаменатель – сумма всех аномалий.

Радиус инерции позволяет оценить пространственную структуру антициклона:

- **малые значения** R соответствуют компактным антициклонам, у которых положительные аномалии давления локализованы вблизи центра;
- **большие значения** R указывают на обширные, размытые образования, занимающие значительную территорию.

Количественные пороги для отнесения к той или иной категории определяются на основе квартильного анализа фактических данных (см. раздел «Результаты»).

1.4. Суммарная интенсивность

Суммарная интенсивность антициклона определяется как интеграл положительных аномалий по всей области:

$$I = \sum_{i,j} \Delta P_{i,j}.$$

Величина I характеризует общую мощность барического образования и, в отличие от площадного индекса (SHI), не нормируется на площадь.

1.5. Квартильный анализ и сопоставление с SHI

Для объективной классификации характеристик антициклона использован квартильный анализ [25]. Для каждого из рассчитанных параметров (долгота центра, широта центра, радиус, интенсивность) определены значения 25-го (Q1) и 75-го (Q3) квартилей, а также медиана (Q2). Межквартильный размах ($IQR = Q3 - Q1$) служит мерой изменчивости. Аналогичная процедура выполнена для традиционного индекса SHI, что позволило выделить следующие фазы: положительные (сильные) антициклоны ($SHI > Q3 = 0.49$) и отрицательные (слабые) антициклоны ($SHI < Q1 = -0.62$).

[8]. Для каждой из групп проведен анализ положения центра тяжести и других характеристик.

2. Результаты

2.1. Многолетняя изменчивость положения и структуры центра тяжести

За 76-летний период (1950–2025 гг.) проведен статистический анализ положения и структуры центра тяжести Сибирского антициклона. Квартильный анализ всего ряда позволил оценить диапазоны изменчивости основных параметров (табл. 1).

Таблица 1. Квартильные характеристики параметров центра тяжести за весь период (1950–2025 гг.)

Table 1. Quartile characteristics of the center of gravity parameters for the entire period (1950–2025)

Параметр	Q1 (25%)	Медиана (50%)	Q3 (75%)	IQR
Долгота, ° в. д.	89.5	97.6	107.5	18.0
Широта, ° с. ш.	45.5	52.7	58.2	12.8
Радиус инерции, °	16.6	20.2	23.2	6.6
Интенсивность	188	398	802	614

Примечание: IQR – межквартильный размах ($Q3 - Q1$).

В 50 % случаев центр тяжести располагается в пределах 89.5–107.5° в. д. и 45.5–58.2° с. ш. Радиус инерции в 50 % случаев лежит в интервале 16.6–23.2°, что свидетельствует о значительной изменчивости пространственной структуры антициклона. На рис. 1 представлена эволюция среднего положения центра тяжести по десятилетиям в холодный период.

В холодный период (ноябрь–март), когда антициклон наиболее интенсивен, среднее положение центра тяжести составляет 97.5° в. д., 50.8° с. ш. Данный период характеризуется наибольшей интенсивностью (877) и промежуточными значениями изменчивости, что делает его наиболее репрезентативным для анализа многолетних трендов.

Дополнительный анализ позволил классифицировать положения центра тяжести по направлениям их смещения относительно классического ядра (40–60° с. ш., 80–120° в. д.). Результаты представлены на рис. 2 в виде цветовой карты, где каждому месяцу соответствует точка, окрашенная в соответствии с тем, куда смещен центр: на север, юг, восток, запад или остается внутри ядра.

Анализ распределения положений центра тяжести Сибирского антициклона относительно классического ядра (рис. 2) показал, что в 61.9 % случаев центр находится внутри ядра.

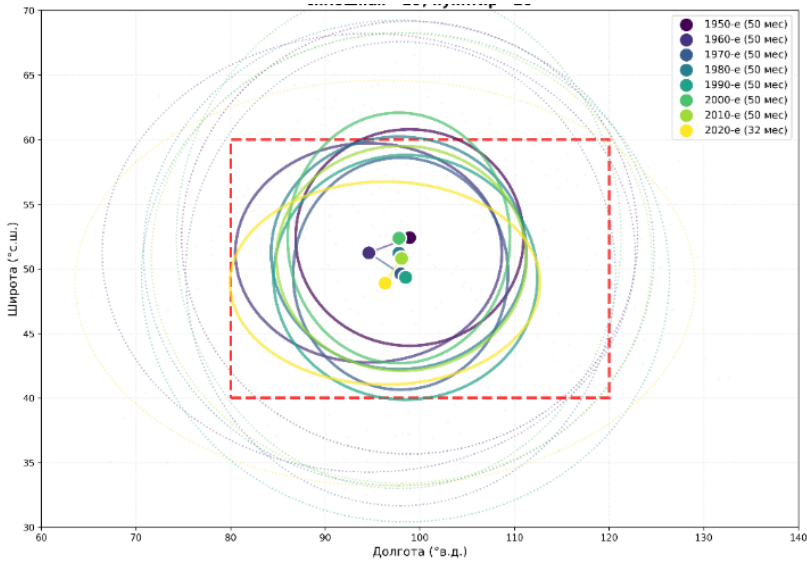


Рис. 1. Эволюция центра тяжести в холодный период (ноябрь–март) по десятилетиям. Сплошные эллипсы соответствуют одному стандартному отклонению, пунктирные – двум.

Fig. 1. Decadal evolution of the center of gravity during the cold period (November–March). Solid ellipses indicate one standard deviation, dashed ellipses – two standard deviations.

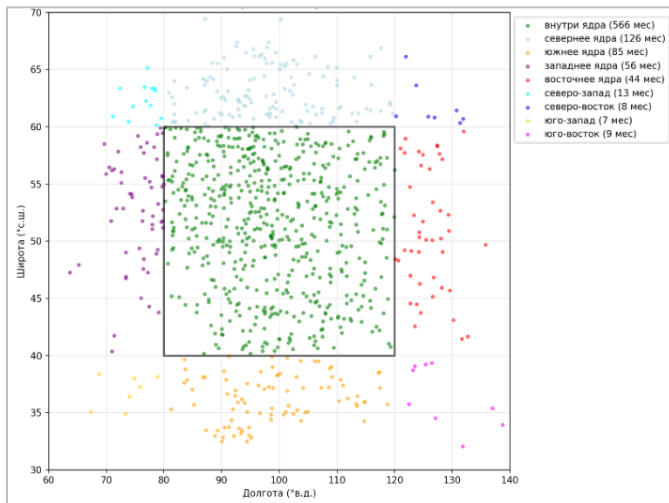


Рис. 2. Положения центра тяжести Сибирского антициклона (1950–2025 гг.) с цветовой индикацией направления смещения относительно классического ядра (красный прямоугольник).

Fig. 2. Positions of the center of gravity of the Siberian High (1950–2025) with color-coded displacement directions relative to the classical core (red rectangle).

Смещения к северу встречаются чаще (13.8 %), чем к югу (9.3 %). Сдвиги в западном направлении (6.1 %) немного преобладают над восточными (4.8 %). Диагональные смещения (северо-запад, северо-восток, юго-запад, юго-восток) наблюдаются редко (в сумме ~4 %). Таким образом, наибольшая концентрация положений центра Сибирского антициклона приходится на область классического ядра и зону к северу от него, тогда как смещения на юг и восток менее характерны.

2.2. Сезонная динамика

Интенсивность антициклона и положение его центра тяжести различаются по сезонам (табл. 2). Максимальная интенсивность достигается зимой (923), что в 2.7 раза превышает летнее значение (348). Это подтверждает, что Сибирский антициклон как барическое образование наиболее выражен именно в холодный сезон. Существенный вклад в усиление антициклона в холодный период вносит орография: горные системы юга Сибири, Монголии и прилегающих районов Центральной Азии создают замкнутые котловины, в которых холодный воздух застаивается, усиливая приземное выхолаживание и способствуя росту давления [1]. Зимой антициклон также наиболее компактен (средний радиус 19.1°), тогда как весной и летом он более размыт (радиус $20.7\text{--}20.8^\circ$). Максимальная интенсивность достигается зимой (923), что в 2.7 раза превышает летнее значение (348).

Зимой антициклон также наиболее компактен (средний радиус 19.1°), тогда как весной и летом он более размыт (радиус $20.7\text{--}20.8^\circ$). Наибольшая подвижность центра наблюдается зимой: лишь 57.4 % времени центр находится внутри классического ядра ($40\text{--}60^\circ$ с. ш., $80\text{--}120^\circ$ в. д.), тогда как весной и летом эта доля превышает 63 %. Это означает, что в холодный сезон антициклон не только интенсивнее, но и более изменчив в пространственном отношении, часто смещаясь за пределы традиционной области, ассоциируемой с его ядром.

Таблица 2. Квартильные характеристики параметров центра тяжести за весь период (1950–2025 гг.)

Table 2. Quartile characteristics of the center of gravity parameters for the entire period (1950–2025)

Сезон	Число месяцев	Средняя долгота	Средняя широта	Средний радиус	Средняя интенсивность	Доля внутри ядра, %
Зима	230	97.3°	50.9°	19.1°	923	57.4
Весна	228	97.8°	51.7°	20.7°	630	64.9
Лето	228	99.0°	53.0°	20.8°	348	63.6
Осень	228	99.9°	51.2°	19.4°	583	61.8
Холодный период	382	97.5°	50.8°	19.2°	877	59.9

Пространственное распределение центра тяжести по сезонам представлено на рис. 3.

Для каждого сезона построена карта плотности распределения: наиболее темные области соответствуют зонам наибольшей концентрации положений центра тяжести. Зимой (рис. 3а) область повышенной плотности вытянута с северо-запада на юго-восток, что указывает на преимущественное смещение центра вдоль этой диагонали, летом (рис. 3в) область повышенной плотности смещается к югу относительно зимы и становится более размытой. Во все сезоны среднее положение центра (черная звездочка) находится в пределах классического ядра.

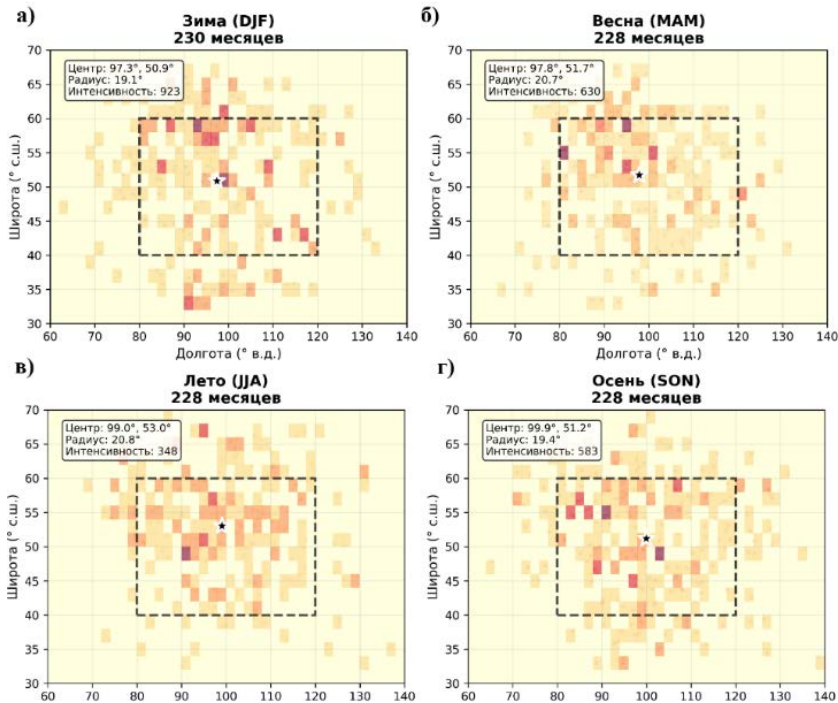


Рис. 3. Распределение центра тяжести Сибирского антициклона по сезонам: зима (а); весна (б); лето (в); осень (г). Цветом показана плотность распределения, черная звездочка – среднее положение, пунктир — классическое ядро 40–60° с. ш., 80–120° в.д.

Fig. 3. Seasonal distribution of the Siberian High center of gravity: winter (а); spring (б); summer (в); autumn (г). Color shading indicates the density of distribution, the black star marks the mean position, and the dashed rectangle shows the classical core (40–60°N, 80–120°E).

Сравнение сезонных положений центра тяжести представлено на рис. 4. Приведены средние положения (фигуры) и эллипсы, соответствующие одному и двум стандартным отклонениям. Эллипсы наглядно демонстрируют сезонные различия в изменчивости: зимний эллипс вытянут

вдоль оси «северо-запад – юго-восток», тогда как летний смещен к северу и характеризуется большей зональной составляющей.

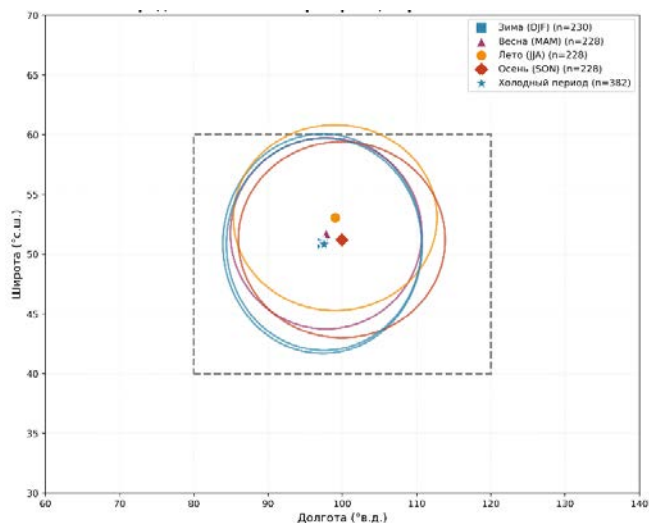


Рис. 4. Сравнение положения центра тяжести по сезонам: средние положения (звездочки) и эллипсы, соответствующие одному и двум стандартным отклонениям. Пунктиром показано классическое ядро.

Fig. 4. Seasonal comparison of the center of gravity position: mean positions (stars) and ellipses corresponding to one and two standard deviations. The classical core is shown by the dashed rectangle.

2.3. Связь с фазами площадного индекса SHI

Для количественной оценки интенсивности Сибирского антициклона традиционно используется площадной индекс SHI (Siberian High Index), рассчитываемый как средняя аномалия приземного давления в области 40–60° с. ш., 80–120° в. д. [7, 19]. Сопоставление положения центра тяжести с фазами площадного индекса SHI позволило оценить, насколько пространственная структура антициклона соответствует его интенсивности, определяемой по фиксированной области. Результаты представлены в табл. 3.

Полученные данные свидетельствуют о четкой связи между интенсивностью антициклона по SHI и его пространственной локализацией. В 93.8 % случаев сильные антициклоны имеют центр тяжести внутри классического ядра (40–60° с. ш., 80–120° в. д.). Они характеризуются не только высокой интенсивностью, но и устойчивым положением: стандартное отклонение по долготе составляет всего $\pm 8.7^\circ$, что значительно меньше, чем у слабых антициклонов. Напротив, слабые антициклоны лишь в 30.4 % случаев локализованы в ядре. Их центр тяжести отличается гораздо большей пространственной изменчивостью (стандартное отклонение по долготе $\pm 17.0^\circ$), что указывает на размытость структуры и частые смещения за пределы традиционной области.

Таблица 3. Характеристики центра тяжести для различных фаз SHI
Table 3. Characteristics of the center of gravity for different SHI phases

Категория	Число месяцев	Средний центр	Средний радиус	Доля внутри ядра, %
Положительная (сильные)	225	96.6°, 52.4°	20.3°	93.8
Нормальная	464	98.2°, 51.6°	—	61.6
Отрицательная (слабая)	224	101.1°, 51.2°	19.4°	30.4

Примечание: Радиус инерции рассчитан только для положительной и отрицательной фаз SHI.

Таким образом, традиционная область для расчета площадного индекса Сибирского антициклона (SHI), 40–60° с. ш., 80–120° в. д., адекватно отражает положение мощных, хорошо организованных антициклонов. Однако слабые фазы часто сопровождаются смещением ядра за ее пределы, что необходимо учитывать при интерпретации площадного индекса, особенно в исследованиях, направленных на анализ пространственной динамики барических образований.

Визуализация связи между положением центра тяжести и фазами SHI представлена на рис. 5.

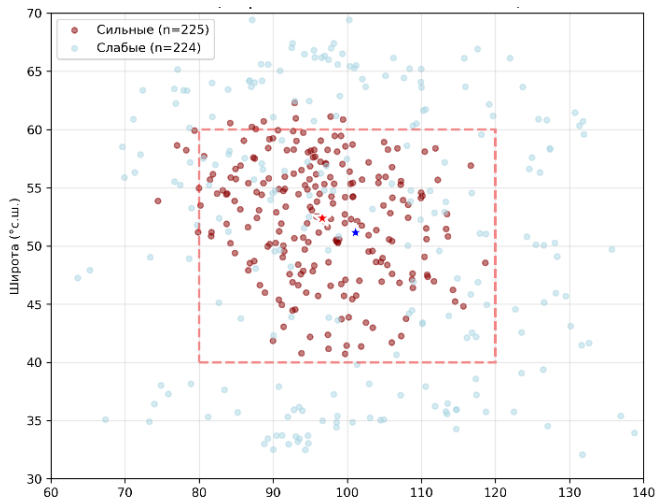


Рис. 5. Анализ положения центра тяжести при разных фазах SHI: распределение точек для сильных и слабых антициклонов.

Fig. 5. Distribution of the center of gravity for strong and weak anticyclones under different SHI phases.

Сильные антициклоны ($SHI > 0.49$) локализованы преимущественно внутри классического ядра (93.8 % случаев), тогда как слабые ($SHI < -0.62$) характеризуются значительно большим разбросом и лишь в 30.4 % случаев

находятся в ядре. Радиус инерции у сильных антициклонов (медиана 20.3°) незначительно превышает таковой у слабых (19.4°), однако разброс значений у слабых существенно выше. Интенсивность, рассчитанная по данным центра тяжести, ожидаемо выше для сильных фаз.

2.4. Спектральный анализ параметров центра тяжести

Для выявления скрытых периодов в изменчивости положения и структуры Сибирского антициклона был проведен спектральный анализ временных рядов параметров центра тяжести (долготы, широты, радиуса инерции и интенсивности). Использовалось быстрое преобразование Фурье (FFT) с предварительным удалением линейного тренда. Анализ охватывал период с 1950 г. по февраль 2026 г. (914 месяцев). Оценка значимости выявленных пиков выполнялась на основе нормированной мощности (максимальное значение принималось за 1). Значимыми считались пики с нормированной мощностью >0.3 . Результаты представлены на рис. 6, а выявленные значимые пики сведены в табл. 4.

Анализ проводился для периодов от 6 месяцев до 75 лет, что позволяет выделить сезонную (1 год), межгодовую и мультигодовую изменчивость, исключая высокочастотные флуктуации с периодами менее 6 месяцев. При этом полугодовая периодичность (0.5 года = 6 месяцев) сохраняется в анализе и отражает внутрисезонную изменчивость.

Долгота центра тяжести обнаруживает наиболее выраженный пик с периодом 9.5 лет (мощность 0.89), что очень близко к 11-летнему циклу солнечной активности [14].

Дополнительные пики приходятся на периоды 4.5 года (возможная связь с Эль-Ниньо) и внутригодовые колебания (0.5, 0.8, 1.1 года), связанные с сезонной изменчивостью.

Широта центра тяжести демонстрирует выраженный пик с периодом 2.5 года (мощность 0.94), что соответствует квазидвухлетней цикличности (QBO) стратосферных ветров [10]. Также присутствуют пики на периодах 4.5 года (Эль-Ниньо) и 1.0–1.1 года (годовой цикл).

Радиус инерции и интенсивность характеризуются преимущественно годовым циклом (мощность 1.00). Иных значимых периодичностей для этих параметров не обнаружено.

Корреляционный анализ выявил умеренную положительную связь между широтой центра и интенсивностью антициклона ($r = +0.351$), что указывает на тенденцию смещения более мощных антициклонов в более высокие широты (к северу). Связь долготы с интенсивностью, а также радиуса инерции с интенсивностью оказалась статистически незначимой ($|r| < 0.13$).

Спектральный анализ параметров центра тяжести выявил значимые периоды в диапазоне от внутригодового до мультигодового: 0.5–1.1 года (сезонная и межгодовая изменчивость), 2.5 года (квазидвухлетняя цикличность QBO), 4–5 лет (характерный диапазон Эль-Ниньо — ENSO) и 9.5 лет

(близко к 11-летнему циклу солнечной активности). Обнаруженные периодичности могут указывать на связь пространственной динамики центра тяжести с гелиогеофизическими процессами и стратосферной циркуляцией. Годовой цикл радиуса инерции и интенсивности подтверждает их сезонную обусловленность.

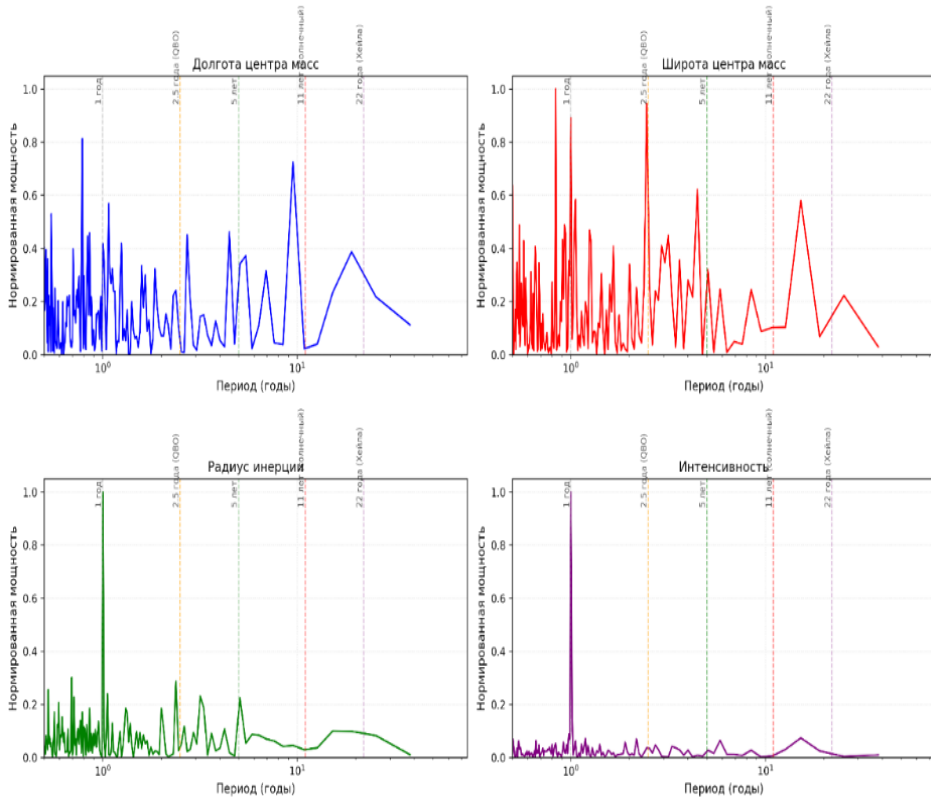


Рис. 6. Спектральная плотность мощности параметров центра тяжести Сибирского антициклона за 1950–2026 гг.: долгота центра(а); широта центра (б); радиус инерции (в); суммарная интенсивность (г). По горизонтальной оси – период (годы, логарифмическая шкала), по вертикальной – нормированная мощность. Вертикальными линиями отмечены характерные периоды: 1 год (сезонный цикл), 2.5 года (квазидвухлетняя осцилляция QBO), 4–5 лет (Эль-Ниньо), 9.5 лет (близко к 11-летнему циклу солнечной активности), 11 лет (солнечный цикл).

Fig. 6. Spectral power density of the Siberian High center of gravity parameters for 1950–2026: longitude of the center (a); latitude of the center (b); radius of inertia (v); total intensity (r). The horizontal axis shows the period (years, logarithmic scale), and the vertical axis shows normalized power. Vertical lines indicate characteristic periods: 1 year (seasonal cycle), 2.5 years (quasi-biennial oscillation, QBO), 4–5 years (El Niño), 9.5 years (close to the 11-year solar activity cycle), and 11 years (solar cycle).

Таблица 4. Значимые периоды в изменчивости параметров центра тяжести
Table 4. Significant periods in the variability of the center of gravity parameters

Параметр	Выявленные периоды (годы)	Мощность
Долгота центра	0.8, 9.5 , 1.1, 0.5, 4.5	1.00, 0.89, 0.70, 0.65, 0.57
Широта центра	0.8, 2.5 , 1.0, 4.5, 1.1	1.00, 0.94, 0.89, 0.62, 0.58
Радиус инерции	1.0 , 0.7	1.00, 0.30
Интенсивность	1.0	1.00

Примечание: Жирным шрифтом выделены наиболее значимые периоды для каждого параметра.

2.5. Связь с плотностью воздуха

Сибирский антициклон как холодное барическое образование формируется преимущественно за счет радиационного выхолаживания приземного слоя воздуха, однако его развитие также обусловлено сложным взаимодействием динамических и орографических факторов [1, 2, 5, 9, 18]. Сибирский антициклон относится к холодным антициклонам: в отличие от динамических (теплых) антициклонов, его повышенное давление обусловлено именно большей плотностью воздуха в нижней тропосфере. Холодный воздух обладает большей плотностью, что, согласно уравнению состояния, непосредственно определяет величину приземного давления.

Для проверки физической обоснованности расчета центра тяжести по полю давления было выполнено сопоставление с положением центра тяжести, рассчитанным по полю плотности воздуха. Плотность вычислялась по уравнению состояния сухого воздуха [4, 7]

$$\rho = \frac{P}{RT},$$

где P – абсолютное давление (Па); T – абсолютная температура (К); $R = 287$ Дж/(кг·К) – удельная газовая постоянная для сухого воздуха.

Для каждого месяца рассчитывались аномалии плотности относительно климатологии 1991–2020 гг., после чего находился центр тяжести по тем же формулам, что и для давления [9].

Сравнение положения центра тяжести, рассчитанного по полю давления и по полю плотности воздуха (табл. 5 и рис. 7), показало их высокую пространственную согласованность. Это подтверждает, что центр тяжести, рассчитанный по давлению, адекватно отражает положение области максимальной плотности воздуха, связанной с холодным ядром антициклона. Несколько больший радиус инерции по плотности (21.1° против 20.0°) указывает на более обширную зону распространения холодного воздуха по сравнению с областью максимальных аномалий давления.

Данный подход согласуется с представлениями о структуре барических образований, согласно которым центр тяжести области повышенного давления должен соответствовать области максимальной плотности воздуха в приземном слое [4, 23].

Таблица 5. Характеристики центра тяжести, рассчитанные по полю давления и по полю плотности воздуха

Table 5. Characteristics of the center of gravity calculated from the pressure and air density fields

Параметр	По давлению	По плотности	Разница
Средняя долгота	98.5° в. д.	98.0° в. д.	0.5° (~55 км)
Средняя широта	51.7° с. ш.	51.2° с. ш.	0.5° (~55 км)
Средний радиус	20.0°	21.1°	+1.1°

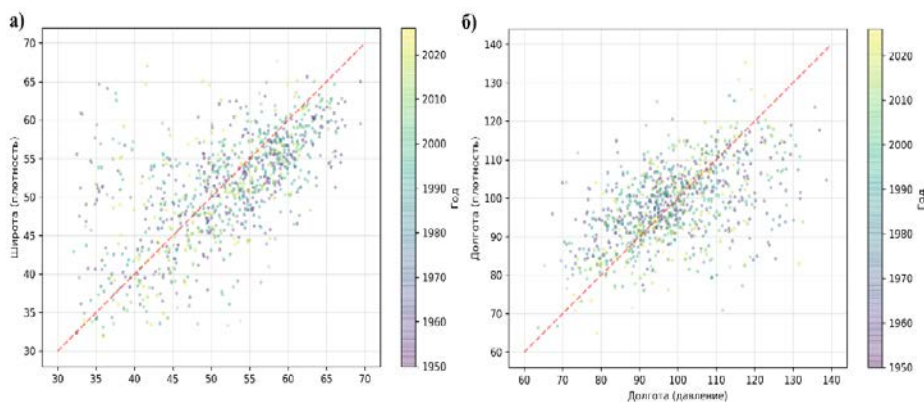


Рис. 7. Сравнение положения центра тяжести по давлению и по плотности: широта центра (а); долгота центра (б). Красный пунктир — линия 1:1 (полное совпадение значений). Цветом точек показан год.

Fig. 7. Comparison of the center of gravity position derived from pressure and density fields: latitude of the center (а); longitude of the center (б). The red dashed line represents the 1:1 line (perfect agreement). The color of the dots indicates the year.

3. Эксцентриситет и ориентация Сибирского антициклона

Для количественной оценки формы области положительных аномалий давления был рассчитан эксцентриситет (вытянутость эллипса). Среднее значение за 1950–2025 гг. составляет 0.892 (медиана 0.917), что указывает на сильно вытянутую, анизотропную форму антициклона. Случаи эксцентриситета ниже 0.5 практически не встречаются (<1 % наблюдений). Сезонная динамика выражена слабо: максимальная вытянутость наблюдается весной (0.905), минимальная – осенью (0.871). Зимой и летом значения близки (0.894 и 0.896). Наибольший разброс ($\sigma = 0.116$) отмечен осенью, когда антициклон только формируется и его пространственная структура еще нестабильна.

В холодный период (ноябрь–март) прослеживается устойчивое снижение эксцентриситета в XXI веке: с 0.900 в 2000–2009 гг. до 0.883 в 2010–2019 гг. и до 0.861 в 2020–2025 гг. (общее снижение ~4.3 %). Это может

указывать на трансформацию пространственной структуры Сибирского антициклона в сторону менее вытянутой формы в условиях современных климатических изменений.

Ориентация большой оси эллипса (азимут) устойчиво меридиональна (север – юг) во все сезоны: $177\text{--}179^\circ$ зимой/летом, 178° весной, 1° осенью. Во все рассмотренные десятилетия средний азимут колеблется в пределах $0\text{--}4^\circ$ или $176\text{--}180^\circ$, что подтверждает неизменную меридиональную ориентацию. Это свидетельствует о доминировании процессов меридионального обмена над зональным переносом, характерном для блокирующих процессов и вторжений арктического воздуха [11, 22].

Снижение эксцентриситета в 2020-е годы может отражать ослабление меридионального градиента температуры в условиях арктического усиления [12, 21], что согласуется с современными тенденциями изменения циркуляции [17].

Таким образом, форма антициклона сохраняется во все сезоны и десятилетия: большая ось эллипса устойчиво ориентирована в меридиональном направлении (север – юг). Данная особенность, вероятно, обусловлена преобладанием процессов меридионального обмена воздушными массами над зональным переносом в регионе Сибири.

Заключение

Разработан подход, основанный на расчете центра тяжести поля положительных аномалий давления. Он позволяет существенно дополнить индекс Сибирского антициклона (SHI) – площадную среднюю аномалию приземного давления в области $40\text{--}60^\circ$ с. ш., $80\text{--}120^\circ$ в. д. В отличие от площадного индекса, характеризующего лишь среднюю интенсивность барического поля в фиксированной области, предложенный метод дает возможность:

- отслеживать смещения ядра антициклона;
- количественно оценивать его компактность (радиус инерции);
- выделять сезонные особенности пространственной структуры;
- сопоставлять положение центра тяжести с фазами SHI.

Установлено, что хорошо развитые антициклоны ($\text{SHI} > 0.49$) в подавляющем большинстве случаев (93.8 %) локализованы в пределах классического ядра ($40\text{--}60^\circ$ с.ш., $80\text{--}120^\circ$ в.д.) и характеризуются устойчивым положением (разброс по долготе $\pm 8.7^\circ$). Слабые антициклоны ($\text{SHI} < -0.62$) лишь в 30.4% случаев находятся внутри ядра и отличаются значительно большей пространственной изменчивостью (разброс по долготе $\pm 17.0^\circ$). Выявлена сезонная динамика: максимальная интенсивность (923) и наибольшая компактность (радиус 19.1°) достигаются зимой, тогда как летом интенсивность снижается в 2.7 раза, а антициклон становится более размытым (радиус 20.8°). При этом зимой наблюдается наибольшая подвижность центра – лишь 57.4 % времени он находится внутри классического ядра.

Физическая обоснованность предложенного метода подтверждена сопоставлением с расчетом центра тяжести по полю плотности воздуха. Показано, что положение центра тяжести по давлению и по плотности характеризуются высокой пространственной согласованностью: различия в среднем положении по широте и долготе не превышают 0.5° . Несколько больший радиус инерции по плотности указывает на более обширную зону распространения холодного воздуха по сравнению с областью максимальных аномалий давления.

Спектральный анализ параметров центра тяжести выявил наличие долгопериодной и годовой изменчивости. Для долготы центра обнаружен значимый пик с периодом 9.5 лет, близкий к 11-летнему циклу солнечной активности. Широта центра демонстрирует выраженный 2.5-летний цикл, соответствующий квазидвухлетней осцилляции (QBO). Радиус инерции и интенсивность характеризуются преимущественно годовым циклом, что подтверждает их тесную связь с сезонными процессами. Корреляционный анализ выявил умеренную положительную связь между широтой центра и интенсивностью антициклона ($r = +0.351$), указывающую на тенденцию смещения более мощных антициклонов к северу.

Разработанная методика расчета центра тяжести позволяет количественно оценить смещения ядра Сибирского антициклона, его компактность и сезонную изменчивость. Метод дает информативные результаты для всех типов антициклонов: для сильных он фиксирует устойчивое положение ядра (разброс по долготе $\pm 8.7^\circ$, доля времени внутри ядра 93.8 %), а для слабых выявляет высокую пространственную изменчивость (разброс по долготе $\pm 17.0^\circ$, доля времени внутри ядра 30.4 %).

Выполнена количественная оценка формы Сибирского антициклона. Показано, что антициклон характеризуется высокой вытянутостью и устойчиво меридиональной ориентацией. В 2020-е годы зафиксировано снижение эксцентриситета до 0.861, что может свидетельствовать о трансформации пространственной структуры антициклона в условиях современного климата.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования характеристик антициклона по данным прогностических моделей, что открывает перспективы для уточнения долгосрочных метеорологических прогнозов. Перспективным направлением дальнейших исследований является анализ влияния циркуляции в верхней тропосфере и стратосфере на пространственно-временную динамику Сибирского антициклона.

Статья подготовлена с использованием УНУ «ИТК ГМП», код: 4071013.

Список литературы

1. Байдал М.Х. Долгосрочные прогнозы погоды и колебания климата Казахстана. – Л.: Гидрометеониздат, 1964–1965. Ч. 1–2. 446 с.

2. Бордовская Л.И. Цибульский А.Е. Повторяемость и скорость движения циклонов и антициклонов над Западной Сибирью // Вопросы географии Сибири. Томск: Изд. ТГУ, 1976. Вып. 9. С. 22-29.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 1. Механика. М.: Физматлит, 2012. 224 с.
4. Онищенко О.Г., Похотелов О.А., Астафьева Н.М. Новая модель квазистационарных вихрей в атмосфере Земли // Геофизические процессы и биосфера. 2018. – Т. 17, № 2. С. 61-70. DOI: 10.21455/gpb2018.2-4
5. Погосян Х.П. Сезонные колебания общей циркуляции атмосферы // Труды Центрального института прогнозов. 1947. Вып. 1 (28). 87 с.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 1. Механика. М.: Физматлит, 2005. 560 с.
7. Сумерова К.А., Хан В.М. Многолетняя динамика характеристик Сибирского антициклона по данным реанализа (1950–2024 гг.) // Фундаментальная и прикладная климатология. 2026. Т. 12, № 2. С. 213-226. DOI: 10.21513/2410-8758-2026-2-213-226
8. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 1986. 416 с.
9. Arakawa H. Thermodynamical Aspects on Siberian High, Ogasawara (or North-Pacific) High and Okhotsk High, ruling the Climate of Japan // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. 1940. Vol. 18, no. 7. P. 213-216. https://doi.org/10.2151/jmsj1923.18.7_213
10. Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J., Hamilton K., Haynes P.H., Randel W.J., Holton J.R., Alexander M.J., Hirota I., Horinouchi T., Jones D.B.A., Kinnerson J.S., Marquardt C., Sato K., Takahashi M. The quasi-biennial oscillation // Reviews of Geophysics. 2001. Vol. 39, no. 2. P. 179-229. DOI: 10.1029/1999RG000073
11. Cheung H.N., Zhou W., Shao Y., Chen W., Mok H.Y., Wu M.C. Observational climatology and characteristics of wintertime atmospheric blocking over Ural–Siberia // Climate Dynamics. 2013. Vol. 41, no. 1. P. 63-79. DOI: 10.1007/s00382-012-1587-6
12. Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M., Whittleston D., Coumou D., Francis J., Dethloff K., Entekhabi D., Overland J., Jones J. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // Nature Geoscience. 2014. Vol. 7, no. 9. P. 627-637. DOI: 10.1038/ngeo2234
13. Hasanean H.M., Almazroui M., Jones P.D., Alamodi A.O. Siberian high variability and its teleconnections with tropical circulations and surface air temperature over Saudi Arabia // Climate Dynamics. 2013. Vol. 41, no. 7. P. 2003-2018. DOI: 10.1007/s00382-012-1657-9
14. Hathaway D.H. The solar cycle // Living Reviews in Solar Physics. 2015. Vol. 12, no. 1. P. 4. DOI: 10.1007/lrsp-2015-4
15. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. Vol. 146 (730). P. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803
16. Mokhov I.I., Petukhov V.K. Atmospheric centers of action and tendencies of their change // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2000. Vol. 36, no. 3. P. 292-299.
17. Overland J.E., Francis J.A., Hall R., Hanna E., Kim S.J., Vihma T. The melting Arctic and midlatitude weather patterns: Are they connected? // Journal of Climate. 2015. Vol. 28, no. 20. P. 7917-7932. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00822.1
18. Palmén E., Newton C.W. Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation. New York: Academic Press, 1969. 603 p.
19. Panagiotopoulos F., Shahgedanova M., Hannachi A., Stephenson D.B. Observed trends and teleconnections of the Siberian high: A recently declining center of action // Journal of Climate. 2005. Vol. 18, no. 9. P. 1411-1422. DOI: 10.1175/jcli3352.1
20. Sahsamanoglou H.S., Makrogiannis T.J., Kallimopoulos P.P. Some aspects of the basic characteristics of the Siberian anticyclone // International Journal of Climatology. 1991. Vol. 11, no. 8. P. 827-839. DOI: 10.1002/joc.3370110805
21. Screen J.A., Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification // Nature. 2010. Vol. 464, no. 7293. P. 1334-1337. DOI: 10.1038/nature09051
22. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // Tellus A. 1990. Vol. 42, no. 3. P. 343-365. DOI: 10.3402/tellusa.v42i3.11882

23. van Delden A.J. An Explanation of the Poleward Mass Flux in the Stratosphere // *Atmosphere*. 2025. Vol. 16, no. 3. P. 343. DOI: 10.3390/atmos16030343
24. Wilks D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*: 4th ed. Elsevier, 2019. 840 p.

References

1. Bajdal M.H. *Dolgosrochnye prognozy pogody i kolebaniya klimata Kazahstana*. Lenin-grad.: Gidrometeoizdat publ., 1964–1965. Chast'. 1–2. 446 s. [in Russ.].
2. Bordovskaya L.I. Povtoryaemost' i skorost' dvizheniya ciklonov i anticiklonov nad Zapadnoy Sibir'yu / L.I. Bordovskaya, A.E. Cibul'skiy. II Voprosy geografii Sibiri. Tomsk: Izd. TGU, 1976. Vyp. 9. S. 2229 [in Russ.].
3. Landau L.D., Lifshic E.M. *Teoreticheskaya fizika*. Tom 1. Mekhanika. Moscow: Fizmatlit publ., 2012. 224 p.
4. Onishchenko O.G., Pohotelov O.A., Astafeva N.M. Novaya model' kvazistacionarnykh vihref v atmosfere Zemli [A new model of quasi-stationary vortices in the Earth's atmosphere]. *Geofizicheskie processy i biosfera [Geophysical processes and biosphere]*. 2018. Vol. 17, no. 2. P. 61–70. DOI: 10.21455/gpb2018.2-4 [in Russ.].
5. Pogosyan H.P. Sezonnye kolebaniya obshchej cirkulyacii atmosfery. *Trudy Central'nogo instituta prognozov*, 1947, vyp. 1 (28), 87 s. [in Russ.].
6. Sivuhin D.V. *Obshchij kurs fiziki*. Tom 1. Mekhanika. Moscow: Fizmatlit publ., 2005, 560 s.
7. Сумерова К.А., Хан В.М. Многолетняя динамика характеристик Сибирского антициклона по данным реанализа (1950–2024 гг.) // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2026. Т. 12, № 2. С. 213–226. DOI: 10.21513/2410-8758-2026-2-213-226
8. Targ S.M. *Kratkij kurs teoreticheskoy mekhaniki*. Moscow: Vysshaya shkola publ., 1986, 416 p.
9. Arakawa H. Thermodynamical Aspects on Siberian High, Ogasawara (or North-Pacific) High and Okhotsk High, ruling the Climate of Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 1940, vol. 18, no. 7, pp. 213–216. https://doi.org/10.2151/jmsj1923.18.7_213
10. Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J., Hamilton K., Haynes P.H., Randel W.J., Holton J.R., Alexander M.J., Hirota I., Horinouchi T., Jones D.B.A., Kinnerson J.S., Marquardt C., Sato K., Takahashi M. The quasi-biennial oscillation. *Reviews of Geophysics*, 2001, vol. 39, no. 2, pp. 179–229. DOI: 10.1029/1999RG000073
11. Cheung H.N., Zhou W., Shao Y., Chen W., Mok H.Y., Wu M.C. Observational climatology and characteristics of wintertime atmospheric blocking over Ural–Siberia. *Climate Dynamics*, 2013, vol. 41, no. 1, pp. 63–79. DOI: 10.1007/s00382-012-1587-6
12. Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M., Whittleston D., Coumou D., Francis J., Dethloff K., Entekhabi D., Overland J., Jones J. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, 2014, vol. 7, no. 9, pp. 627–637. DOI: 10.1038/ngeo2234
13. Hasananean H.M., Almazroui M., Jones P.D., Alamodi A.O. Siberian high variability and its teleconnections with tropical circulations and surface air temperature over Saudi Arabia. *Climate Dynamics*, 2013, vol. 41, no. 7, pp. 2003–2018. DOI: 10.1007/s00382-012-1657-9
14. Hathaway D.H. The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 4. DOI: 10.1007/lrsp-2015-4
15. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146 (730), pp. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803
16. Mokhov I.I., Petukhov V.K. Atmospheric centers of action and tendencies of their change. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2000, vol. 36, no. 3, pp. 292–299.
17. Overland J.E., Francis J.A., Hall R., Hanna E., Kim S.J., Vihma T. The melting Arctic and midlatitude weather patterns: Are they connected? *Journal of Climate*, 2015, vol. 28, no. 20, pp. 7917–7932. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00822.1
18. Palmén E., Newton C.W. *Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation*. New York: Academic Press publ., 1969, 603 p.

19. Panagiotopoulos F., Shahgedanova M., Hannachi A., Stephenson D.B. Observed trends and teleconnections of the Siberian high: A recently declining center of action. *Journal of Climate*, 2005, vol. 18, no. 9, pp. 1411-1422. DOI: 10.1175/jcli3352.1
20. Sahsamanoglou H.S., Makrogiannis T.J., Kallimopoulos P.P. Some aspects of the basic characteristics of the Siberian anticyclone. *International Journal of Climatology*, 1991, vol. 11, no. 8, pp. 827-839. DOI: 10.1002/joc.3370110805
21. Screen J.A., Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 2010, vol. 464, no. 7293, pp. 1334-1337. DOI: 10.1038/nature09051
22. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking. *Tellus A*, 1990, vol. 42, no. 3, pp. 343-365. DOI: 10.3402/tellusa.v42i3.11882
23. van Delden A.J. An Explanation of the Poleward Mass Flux in the Stratosphere. *Atmosphere*, 2025, vol. 16, no. 3, pp. 343. DOI: 10.3390/atmos16030343
24. Wilks D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*: 4th ed. Elsevier, 2019, 840 p.

Поступила 08.06.2026; принята в печать 22.10.2026.
Submitted 08.06.2026; accepted for publication 22.10.2026.