

Многолетняя динамика характеристик Сибирского антициклона по данным реанализа (1950-2024 гг.)

К.А. Сумерова¹⁾, В.М. Хан^{1,2)}*

¹⁾ Гидрометцентр России,
Россия, 123376, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, стр. 1

²⁾ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3

*Адрес для переписки: *sum-ksusha@yandex.ru*

Реферат. В работе представлены результаты статистического анализа временной изменчивости характеристик Сибирского антициклона (СА), рассматриваемых на основе индекса SHI (Siberian High Index). Индекс рассчитан по данным реанализа климатической модели ERA5 за 75-летний период (1950-2024 гг.). Проведена комплексная статистическая оценка ряда рассчитанного индекса, разработаны критерии для выделения значимых фаз исследованы сезонные особенности и временная структура многолетнего ряда индекса. Выявлено, что эволюция СА в последние десятилетия характеризуется качественным сдвигом барического режима: начиная с XXI века, наблюдается устойчивый рост средних по десятилетиям значений индекса и их переход в положительную область в 2010-х годах. При этом, с конца XX века отмечается тенденция к снижению межгодовой изменчивости индекса SHI, что указывает на переход к более устойчивому антициклоническому погодному режиму над Сибирью в последние десятилетия. В то же время общее распределение статистически значимых отклонений индекса SHI (24.8% положительных и 24.6% отрицательных аномалий) остаётся почти уравновешенным, подчеркивая преобладающую роль естественной составляющей в многолетней изменчивости ряда значений индекса SHI.

Ключевые слова. Сибирский антициклон, индекс SHI, изменчивость атмосферной циркуляции, климатический тренд, ERA5, экстремальные события, квартили, стандартное отклонение, сезонная изменчивость.

Long-term dynamics of the Siberian Anticyclone characteristics based on reanalysis data (1950–2024)

K.A. Sumerova¹⁾, V.M. Khan^{1,2)}*

¹⁾ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
13, Bolshoi Predtechenskii Lane, Moscow, 123242, Russian Federation

²⁾ Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
3, Pyzhevskii Lane, Moscow, 119017, Russian Federation

*Correspondence address: *sum-ksusha@yandex.ru*

Abstract. This study presents a statistical analysis of the temporal variability of the Siberian High (SH), based on the Siberian High Index (SHI). The index was calculated using ERA5 reanalysis data over a 75-year period (1950-2024). A comprehensive statistical assessment of the SHI series was performed, including the development of objective criteria for identifying significant phases, and the investigation of seasonal features and the temporal structure of the long-term series. The results reveal a qualitative shift in the pressure regime of the SH in recent decades. Beginning in the 21st century, a steady increase in decadal mean index values is observed, culminating in their shift into positive territory in the 2010^s. Concurrently, since the late 20th century, there has been a trend towards reduced interannual variability of the SHI, as indicated by a decreasing standard deviation (σ). This suggests a transition towards a more stable anticyclonic weather regime over Siberia in recent decades. Despite this long-term trend, the overall distribution of statistically significant deviations remains nearly balanced (24.8% positive and 24.6% negative anomalies), underscoring the persistent and dominant role of natural variability within the SHI series.

Keywords. Siberian High, Siberian High Index (SHI), atmospheric circulation variability, climate trend, ERA5, extreme events, quartiles, standard deviation.

Введение

Сибирский антициклон (СА) является одним из основных сезонных центров действия атмосферы в Северном полушарии в холодный период года. Как доминирующий барический центр над Евразией в холодный период года, он формирует режим погоды с аномально низкими температурами воздуха у поверхности земли, слабыми ветрами и явлениями связанных с хорошо развитыми инверсиями температуры воздуха в тропосфере (Ding, 1990; Panagiotopoulos et al., 2005). Положение и интенсивность СА, с одной стороны, определяют формирование волн холода, а с другой – сами модулируются крупномасштабными процессами переноса холодных воздушных масс; эта взаимосвязь в совокупности определяет климат Северной Евразии (Cohen et al., 2001; Wu, Wang, 2002). Сезонная смена Сибирского антициклона на ложбину Азиатской депрессии в теплый период года делает регион от западного Казахстана до Забайкалья областью с наиболее резко выраженным годовым ходом приземного давления в глобальном масштабе (Schiemann et al., 2009).

В условиях наблюдаемых климатических изменений, сопровождающихся интенсивным потеплением в арктических широтах, актуальным становится вопрос об эволюции режимных характеристик СА (Overland et al., 2015). Современные модели (Francis, Vavrus, 2012; 2015) предполагают, что изменения в Арктике могут влиять на планетарную волновую активность и меридиональный перенос, что, в свою очередь, способно оказать влияние на интенсивность и устойчивость СА. Однако эмпирические оценки долгосрочных трендов в метеорологических параметрах самого Сибирского антициклона остаются неоднозначными (Hasanean et al., 2013), что подчеркивает

необходимость исследования долговременных рядов этих параметров (Barnes, 2013; Wu, Wang, 2002).

Целью данной работы является комплексный статистический анализ состояния барического поля в регионе формирования Сибирского антициклона по данным за 75-летний период наблюдений (1950-2024 гг.) с использованием специализированного индекса (Siberian High Index, SHI). В основные задачи исследования входило: (1) оценка общей статистики и закономерностей распределения *среднемесячных* значений индекса SHI; (2) разработка объективных критериев для определения граничных условий барического режима; (3) анализ осредненной по десятилетиям изменчивости значений индекса; и (4) исследование особенностей сезонного хода индекса и выделение периодов с устойчивыми экстремальными значениями.

Методология исследования основана на анализе ежемесячных значений индекса SHI, рассчитываемого как усреднение аномалий приземного атмосферного давления над районом географического центра антициклона (40-60° с.ш., 80-120° в.д.) выполненного в соответствии с установленными методами (Panagiotopoulos et al., 2005; Hasanean et al., 2013). Проведённый анализ позволил не только количественно охарактеризовать долговременные тенденции, но и детально исследовать межгодовую и внутрисезонную изменчивость барического поля над обширным регионом Евразии от Западного Казахстана до Забайкалья. Результаты работы вносят вклад в понимание изменчивости климата Северной Азии во второй половине XX – начале XXI века.

Материалы и методы

Для количественной характеристики состояния Сибирского антициклона в работе использован индекс SHI (Siberian High Index). Индекс рассчитывается как средняя аномалия приземного атмосферного давления относительно климатической нормы (1991-2020 гг.) в пределах географического региона, границы которого приблизительно совпадают с климатическим положением центра зимнего Сибирского антициклона: 40-60° с.ш., 80-120° в.д. (Panagiotopoulos et al., 2005; Hasanean et al., 2013). Для расчетов были использованы ежемесячные значения приземного атмосферного давления (MSLP), полученные из данных реанализа ERA5 (ECMWF Reanalysis 5th Generation) за период с января 1950 г. по декабрь 2024 г. (Hersbach et al., 2020).

Корректность использования данных реанализа для анализа долгопериодных тенденций антициклонической активности над Западной Сибирью подтверждается результатами работы Горбатенко и др. (2009), в которой проведено прямое сопоставление характеристик антициклонов, по данным реанализа NCEP/DOE AMIP-II и по субъективному анализу синоптических карт за 1976-2006 гг. Авторы показали, что, несмотря на количественные различия в идентификации отдельных барических образований, многолетняя изменчивость и знак тренда в обоих источниках данных совпадают. Выбранный нами индекс SHI минимизирует возможные расхождения, связанные с недоучетом мелких образований в реанализе.

Для статистического анализа ряда SHI использовались стандартные статистические метрики: среднее значение многолетнего ряда индекса, стандартное отклонение (σ), минимум, максимум, квартили Q1 и Q3, медиана.

Для объективного выделения аномальных значений индекса и соответствующих им барических режимов использовались два независимых статистических подхода:

1. Критерий на основе стандартного отклонения: значения, выходящие за пределы ($\pm\sigma$) от среднего, рассматривались как значительные аномалии, характеризующие выраженные отклонения от среднего состояния.

2. Критерий на основе квартилей: значения, ниже первого квартиля (Q1) и выше третьего квартиля (Q3) интерпретировались как статистически значимые нижние и верхние экстремумы, соответствующие фазам ослабленного и усиленного антициклонального режима.

Анализ временной структуры значений ряда индекса включал:

- анализ средних значений индекса и их стандартного отклонения по скользящим 10-летним интервалам для выявления долгосрочных трендов в многолетнем ряде индекса и степени изменчивости значений индекса;
- составление ранжированных списков временных интервалов, с наиболее значительными положительными и отрицательными аномалиями индекса shi;
- расчёт среднего сезонного хода значений индекса путём их осреднения по каждому календарному месяцу за весь период.

Физическая интерпретация экстремальных значений индекса SHI существенно зависит от сезона из-за кардинальной перестройки атмосферной циркуляции в рассматриваемом регионе. В холодный период (октябрь-апрель) статистически значимые положительные значения индекса указывают на усиление и устойчивость Сибирского антициклона, а отрицательные – его аномального ослабления или разрушения. В тёплый период (май-сентябрь), когда в регионе распространяется ложбина от Азиатской депрессии, интерпретация меняется: положительные аномалии в значениях индекса SHI указывают на ослабление ложбины Азиатской депрессии, а отрицательные – на её углубление и устойчивость.

Результаты

Статистическая структура и изменчивость индекса SHI

Проведенный анализ 75-летнего ряда среднемесячных значений индекса SHI (1950–2024 гг.) позволил выявить его основные статистические особенности. Распределение значений ряда близко к нормальному, характеризуется небольшой положительной асимметрией (0.251) (стандартное отклонение (σ) = 0.815) указывает на умеренную изменчивость значений ряда. Среднее значение за весь ряд рассчитанного индекса (-0.039) и медианой (-0.070), близкими к нулевым значениям, указывают на преобладание фоновых (наиболее

типичных) условий развития Сибирского антициклона, близких к климатической норме, на исследуемом 75-летнем интервале.

Квартильный размах (от $Q1 = -0.62$ до $Q3 = 0.49$) определяет диапазон, в который попадает 50% наиболее вероятных значений индекса (табл. 1). Абсолютные экстремумы ряда демонстрируют предельную амплитуду естественной изменчивости системы. Исторический минимум (-2.22 в мае 1963 г.) соответствует эпизоду исключительно глубокой и активной ложбины Азиатской депрессии, полностью подавившей антициклон. Напротив, абсолютный максимум (2.84 в феврале 1964 г.) отражает период аномально интенсивного и устойчивого Сибирского антициклона.

Таблица 1. Основные статистические характеристики ряда SHI (1950-2024 гг.)

Table 1. Main statistical characteristics of the SHI series (1950-2024)

Параметр	Значение	Примечание
Среднее	-0.039	Средняя аномалия индекса SHI за рассматриваемый период
Медиана (Q2)	-0.070	Срединное значение упорядоченной выборки
Q1 (25-й перцентиль)	-0.62	Нижний порог статистически значимой отрицательной аномалии
Q3 (75-й перцентиль)	0.49	Верхний порог статистически значимой положительной аномалии
Стандартное отклонение (σ)	0.815	Мера разброса значений индекса относительно среднего значения
Абсолютный минимум	-2.22 (май 1963)	Эпизод исключительно глубокой ложбины от Азиатской депрессии
Абсолютный максимум	2.84 (февраль 1964)	Эпизод наиболее развитого Сибирского антициклона

Для оценки амплитуды колебаний и повторяемости экстремальных значений ряд значений индекса SHI был разделен на три класса в соответствии со стандартным отклонением ($\pm\sigma$). Распределение по категориям оказалось практически симметричным (рис. 1): на долю положительных (значения $SHI > \sigma$) и отрицательных (значения $SHI < -\sigma$) отклонений пришлось 24.8% и 24.6% от всего периода наблюдений соответственно, а условия, близкие к нормальным ($\pm\sigma$), наблюдались в 50.7% случаев. Распределение значений индекса близко к нормальному (асимметрия 0.251, эксцесс 0.010), а положение статистических пороговых значений внутри этого распределения наглядно представлено на гистограмме (рис. 2).

Для выделения статистически значимых фаз индекса, представляющих наибольший интерес для анализа климатических режимов, были использованы квартильные пределы (табл. 1). Значения, превышающие $Q3 (> +0.49)$, были отнесены к положительной фазе (зимой усиление антициклона, летом ослабление депрессии), а значения ниже $Q1 (< -0.62)$ – к отрицательной фазе

(зимой ослабление антициклона, летом усиление депрессии). Такое уравновешенное распределение свидетельствует об отсутствии преобладания одного знака аномалий на всём 75-летнем интервале, что является отражением высокой естественной составляющей в изменчивости значений индекса.

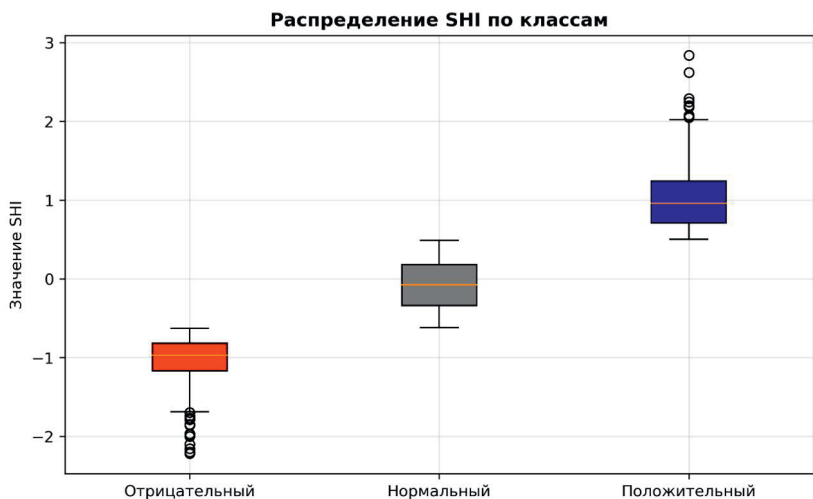


Рисунок 1. Распределение месячных значений индекса SHI (1950-2024 гг.) по классам, выделенным на основе стандартного отклонения ($\pm\sigma$)
Проценты соответствуют доле времени в каждом классе

Figure 1. Distribution of monthly SHI index values (1950-2024) into classes identified based on standard deviation ($\pm\sigma$)
Percentages correspond to the proportion of time in each class

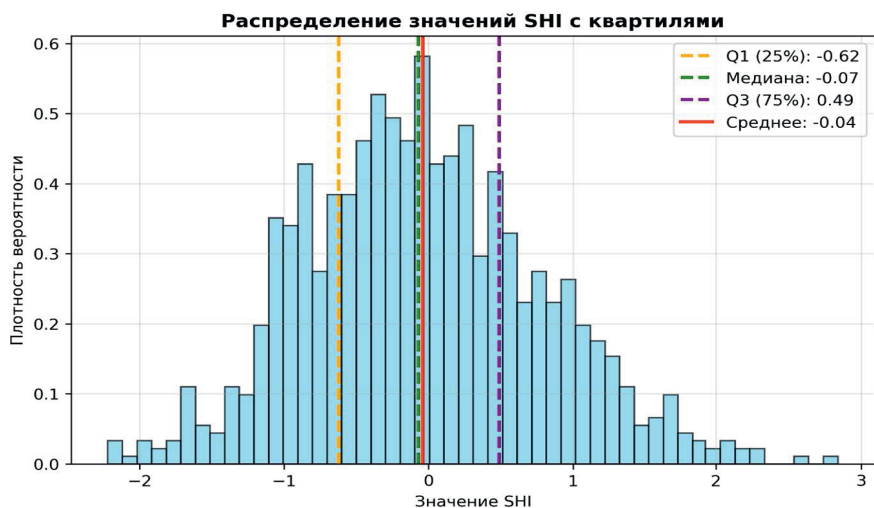


Рисунок 2. Гистограмма распределения значений индекса SHI
 Вертикальные пунктирные линии: квантиль $Q1$, медиана и квантиль $Q3$

Figure 2. Histogram of the distribution of SHI index values
 The vertical dashed lines indicate the first quartile ($Q1$), the median, and the third quartile ($Q3$)

Таким образом, определённые на основе стандартного отклонения (σ) и квартилей Q1 и Q3 пределы (табл. 1) образуют двухуровневую систему объективных критериев: первый уровень из стандартного отклонения ($\pm\sigma$) описывает амплитуду колебаний индекса и частоту появлений значимых отклонений, а второй уровень (Q1/Q3) позволяет выделять статистически значимые фазы колебаний в долговременном ряде индекса для последующего анализа климатической роли этих колебаний.

Динамика средней интенсивности, изменчивости и сезонность

Экстремумы и сезонные особенности

Абсолютный максимум в многолетнем ходе индекса Сибирского антициклона (+2.84), соответствующий эпизоду развития исключительно интенсивного антициклона, зарегистрированному в феврале 1964 г., абсолютный минимум (-2.22), отражающий распространение глубокой ложбины от азиатской депрессии в северо-восточном направлении в мае 1963 г. Анализ пяти наиболее выраженных аномалий показывает, что хорошо выраженные положительные отклонения (характеризующие усиление антициклона) могут формироваться не только зимой (январь, февраль), но и весной (март, апрель), что расширяет представление о сезонных рамках выраженных проявлений Сибирского антициклона. Хорошо выраженные отрицательные аномалии индекса (характеризующие ослабление антициклона и углубление ложбины) чаще отмечаются в осенне-зимний период, что, вероятно, связано с прохождением глубоких циклонов.

Сезонный ход среднего значения SHI (рис. 3) демонстрирует классическую для региона годовую цикличность: минимум значений наблюдается летом (июнь-август), в сезон проникновения ложбины от азиатской депрессии, и чётко выраженный максимум в холодный сезон (ноябрь-февраль), соответствующий периоду формирования и максимального развития Сибирского антициклона.

Анализ скользящих средних по 10-летним интервалам выявил ключевую для данного исследования тенденцию, представленную в табл. 2. В средних значениях индекса SHI, в основном бывшими отрицательными на протяжении большей части второй половины XX века, наметился направленный положительный тренд, установившийся в начале XXI века. Так, если в 2000-е годы среднее значение составило -0.122, то уже в следующее полное десятилетие (2010-е) оно впервые стало положительным (+0.092), а в текущем неполном периоде 2020-2024 гг. его значение достигло +0.182. Одновременно с ростом средней интенсивности Сибирского антициклона с конца XX века наблюдается общая тенденция к снижению межгодовой изменчивости индекса SHI в рассматриваемом регионе: стандартное отклонение уменьшилось с 0.997 (1950-е годы) до ~0.78 в последние десятилетия.

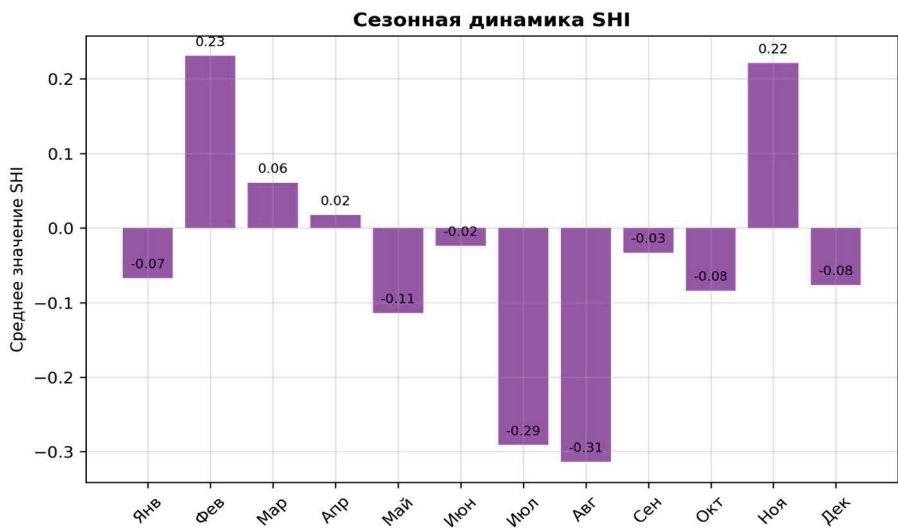


Рисунок 3. Сезонный ход среднего значения SHI
(осреднение по всем годам для каждого месяца)

Figure 3. Seasonal cycle of the mean SHI value (averaged over all years for each month)

Таблица 2. Статистика по десятилетиям

Table 2. Statistics by decade

Десятилетие	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум	Количество
1950-1959	-0.143	0.997	-2.20	2.20	120
1960-1969	0.004	0.864	-2.22	2.84	120
1970-1979	-0.142	0.832	-1.69	2.29	120
1980-1989	-0.027	0.781	-2.10	2.06	120
1990-1999	-0.048	0.706	-1.59	1.65	120
2000-2009	-0.122	0.715	-2.16	1.70	120
2010-2019	0.092	0.778	-1.65	2.25	120
2020-2024*	0.182	0.770	-1.04	1.82	60

Примечание: * – период неполный.

Совокупность этих факторов – устойчивый рост средних десятилетних значений индекса SHI и снижение его межгодовой изменчивости (σ), наметившееся с конца XX века, – указывает на стабилизацию состояния Сибирского антициклона в последние три десятилетия.

Кластеризация значимых событий

Несмотря на выявленный долгосрочный тренд к стабилизации, в ряде индекса SHI сохраняется высокая степень естественной изменчивости. Статистически значимые отклонения значений индекса SHI от среднего многолетнего ($|SHI| > \sigma$) распределены по годам неравномерно, образуя на временной шкале кластеры. Максимальное число таких месяцев (10) зафиксировано в

1956 году. Пики активности в развитие Сибирского антициклона также пришлись на 1957, 1977, 1984, 1992 и 1996 годы (по 9 месяцев). Наблюдаемая кластеризация, особенно выраженная в середине и конце XX века, может быть следствием сильного влияния низкочастотных колебаний крупномасштабной циркуляции атмосферы на эволюцию СА. Но в начале XXI века столь выраженное ранее группирование статистически значимых отклонений от среднего значения наблюдается реже, что согласуется с предположением об устойчивости Сибирского антициклона.

Дискуссия

Смена в режиме Сибирского антициклона: усиление и стабилизация

Наиболее значимым результатом работы является выявленная совокупная тенденция к возрастанию средних по десятилетиям значений индекса SHI, ставшее статистически значимым в XXI веке, и снижение межгодовой изменчивости (σ) значений индекса SHI, наметившееся ещё в конце XX столетия (см. табл. 2). Переход среднего в десятилетиях значения индекса SHI в положительную область в 2010-х годах на фоне снижения σ примерно на 22% за период наблюдений (с 0.997 в 1950-х до ~ 0.78 в XXI веке) позволяет говорить не просто об усилении, а об устойчивости Сибирского антициклона (СА) в холодный период.

Данная динамика соответствует с современными представлениями о влиянии арктического усиления на атмосферную циркуляцию средних широт (Overland et al., 2015; Francis, Vavrus, 2015). Ослабление меридионального градиента в поле температуры воздуха между Арктикой и средними широтами теоретически может приводить к уменьшению амплитуды планетарных тропосферных волн, снижению зональной составляющей скорости ветра и увеличению частоты квазистационарных, меридионально-ориентированных форм циркуляции атмосферы. Наблюдаемое снижение изменчивости СА и рост его средней интенсивности хорошо вписываются в эту схему, предполагая сезонную и межгодовую устойчивость одного из основных центров действия атмосферы Евразии в холодный период.

Выявленная тенденция подтверждается также выводами, представленными в работе В.В. Поповой (2018) о смене циркуляционных режимов на севере Евразии: усиление зональной циркуляции в 1970-1990-х гг. (NAO) сменилось с середины 1990-х гг. возрастанием роли меридиональных процессов, связанных со Скандинавским центром действия (SCAND). Наблюдаемое снижение σ индекса SHI может интерпретироваться как региональное проявление этой перестройки, ведущей к стабилизации Сибирского антициклона.

Следует отметить, что отрицательное среднее значение индекса SHI за весь период (-0.039) и смещённая в отрицательную область медиана (-0.070) в значительной степени обусловлены выбором базового периода для нормы (1991-2020 гг.), который сам попадает на фазу усиления антициклона (см. табл. 2). Это означает, что относительно современной климатологии вторая

половина XX века характеризовалась ослабленным состоянием Сибирского антициклона. Выявленный положительный тренд в средних по десятилетиям значениях индекса, завершившийся переходом в положительную область в 2010-х годах, можно интерпретировать как возврат к интенсивному состоянию антициклона, наблюдаемому в середине XX века, но уже на фоне сниженной межгодовой изменчивости (σ).

Полученные результаты об усилении Сибирского антициклона и снижении его межгодовой изменчивости хорошо соотносятся с результатами независимых исследований. В работе Бардина и др. (2019) на основе анализа траекторий антициклонов, по данным реанализа NCEP/NCAR за 1951-2017 гг., показано, что наиболее выраженные долгопериодные изменения повторяемости антициклонов происходят именно в области Сибирского антициклона: значительный рост между 1950-ми и 2000-ми годами. Работы Горбатенко и др. (2009), выполненные по синоптическим картам, также фиксируют увеличение антициклонической активности над Западной Сибирью во второй половине XX века. Особо отметим, что в работе Горбатенко и др. (2009) на основе как данных реанализа, так и синоптических карт выявлено увеличение продолжительности антициклональной погоды к концу исследуемого периода, что непосредственно согласуется с нашей оценкой стабилизации Сибирского антициклона. Важным дополнением служат результаты Складневой и др. (2018), которые на основе анализа синоптических карт для района Томска за 1993-2016 гг. показывают устойчивую тенденцию к снижению вторжений арктического воздуха и росту повторяемости субтропических и тропических воздушных масс. Это наблюдение согласуется с нашей гипотезой о влиянии арктического усиления на циркуляцию средних широт и подтверждает перестройку атмосферных процессов в регионе.

Естественная изменчивость на фоне долгосрочного тренда

Важно подчеркнуть, что выявленный тренд к устойчивости Сибирского антициклона не отменяет его высокую естественную изменчивость, присущей многолетнему режиму СА. Практически симметричное распределение статистически значимых фаз проявления Сибирского антициклона (рис. 1) и их кластеризация по отдельным годам (например, пики активности в 1956, 1992, 1996 гг.) свидетельствуют о сильном влиянии на эволюцию Сибирского антициклона низкочастотной внутренней изменчивости общей климатической системы. Эта изменчивость может модулироваться такими явлениями, как Эль-Ниньо – Южное колебание, фазами глобальных мод изменчивости атмосферной циркуляции или крупномасштабными колебаниями температуры поверхности океана, в северной части Тихого океана, которые, согласно работе (Cohen et al., 2001; Wu, Wang, 2002), могут оказать влияние на интенсивность меридионального переноса в тропосфере над восточной частью Евразии. Таким образом, наблюдаемый тренд к устойчивости Сибирского антициклона можно интерпретировать как изменение фонового состояния, на текущем этапе которого возможны резкие усиления или ослабления Сибирского антициклона, связанные с естественными колебаниями.

Сезонные аспекты и прикладные следствия

Присутствие весенних месяцев (март, апрель) в числе пяти абсолютных максимумов индекса SHI за весь период наблюдений указывает на то, что хорошо развитые антициклоны в исследуемом регионе могут формироваться и *вне* календарной зимы. Это наблюдение имеет прямое прикладное значение, поскольку подобные устойчивые антициклоны *в весенний период способны* вызывать затяжные заморозки и аномально холодную погоду, что представляет серьёзный риск для сельского хозяйства.

Заключение

Проведённый анализ 75-летнего ряда индекса SHI, рассчитанного относительно нормы 1991-2020 гг., выявил статистически значимую эволюцию режима Сибирского антициклона (СА) во второй половине XX – начале XXI века. Установлен переход к качественно новому режиму СА, характеризующемуся повышенной средней интенсивностью (относительно современного климата) и пониженной межгодовой изменчивостью. Ключевой вехой этого перехода стал сдвиг среднего по десятилетиям значения индекса в положительную область в 2010-х годах, что указывает на устойчивость антициклона. Одновременно с конца XX века наблюдается общая тенденция к снижению амплитуды колебаний атмосферного давления в его центре (σ). Это можно интерпретировать как стабилизацию Сибирского антициклона, что согласуется с гипотезами об изменении характера планетарной волновой активности в условиях арктического усиления. Полученные результаты согласуются с выводами независимых исследований, основанных как на данных реанализа, так и на анализе синоптических карт.

Выявленная тенденция имеет важное прикладное значение, так как может быть одной из причин увеличения повторяемости устойчивых антициклонических ситуаций над Сибирью в холодный сезон. Что, в свою очередь, может оказать влияние на формирование аномальных погодных условий, таких как интенсивные похолодания (волны холода) над Северной Евразией. Учёт выявленных долгосрочных изменений состояния Сибирского антициклона и их физических причин имеет важное прикладное значение для повышения точности сезонных прогнозов и совершенствования климатических моделей для северных регионов Евразии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (Проект № 25-77-31009).

Список литературы

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2019) Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 3, с. 32-58, doi:10.21513/0207-2564-2019-3-32-58.

Горбатенко, В.П., Ипполитов, И.И., Логинов, С.В., Поднебесных, Н.В. (2009) Исследование циклонической и антициклонической активности на территории Западной Сибири по данным реанализа NCEP/DOE AMIP-II и синоптических карт, *Оптика атмосферы и океана*, т. 22, № 1, с. 38-41.

Попова, В.В. (2018) Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 84-111, doi:10.21513/2410-8758-2018-1-84-111.

Скляднева, Т.К., Белан, Б.Д., Рассказчикова, Т.М., Аршинова, В.Г. (2018) Изменение синоптического режима Томска в конце XX – начале XXI в., *Оптика атмосферы и океана*, т. 31, № 11, с. 895-901, doi:10.15372/AOO20181106.

Barnes, E.A. (2013) Revisiting the evidence linking Arctic amplification to extreme weather in midlatitudes, *Geophysical Research Letters*, vol. 40, no. 17, pp. 4734-4739, doi:<https://doi.org/10.1002/grl.50880>.

Cohen, J., Saito, K., Entekhabi, D. (2001) The role of the Siberian high in Northern Hemisphere climate variability, *Geophysical Research Letters*, vol. 28, no. 2, pp. 299-302, doi:<https://doi.org/10.1029/2000GL011927>.

Ding, Y. (1990) Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia, *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 44, no. 1, pp. 281-292, doi:<https://doi.org/10.1007/BF01026822>.

Francis, J.A., Vavrus, S.J. (2012) Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, no. 6, L06801, doi:<https://doi.org/10.1029/2012GL051000>.

Francis, J.A., Vavrus, S.J. (2015) Evidence for a waiver jet stream in response to rapid Arctic warming, *Environmental Research Letters*, vol. 10, no. 1, 014005, doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014005> (https://www.researchgate.net/publication/270649136_Evidence_for_a_wavier_jet_stream_in_response_to_rapid_Arctic_warming).

Hasanean, H.M., Almazroui, M., Jones, P.D., Alamodi, A.O. (2013) Siberian high variability and its teleconnections with tropical circulations and surface air temperature over Saudi Arabia, *Climate Dynamics*, vol. 41, no. 7, pp. 2003-2018, doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-012-1657-9>.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Thépaut, J.N. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049, doi:<https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Overland, J.E., Dethloff, K., Francis, J.A., Hall, R.J., Hanna, E., Kim, S.J., Vihma, T. (2015) The melting Arctic and midlatitude weather patterns: Are they connected? *Journal of Climate*, vol. 28, no. 20, pp. 7917-7932, doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00822.1>.

Panagiotopoulos, F., Shahgedanova, M., Hannachi, A., Stephenson, D.B. (2005) Observed trends and teleconnections of the Siberian high: A recently

declining center of action, *Journal of Climate*, vol. 18, no. 9, pp. 1411-1422, doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI3352.1>.

Schiemann, R., Lüthi, D., Schär, C. (2009) Seasonality and interannual variability of the westerly jet in the Tibetan Plateau region, *Journal of Climate*, vol. 22, no. 11, pp. 2940-2957, doi: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2625.1>.

Wu, B., Wang, J. (2002) Winter Arctic Oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon, *Geophysical Research Letters*, vol. 29, no. 19, p. 1897, doi: <https://doi.org/10.1029/2002GL015373>.

References

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2019) Izmenchivost' antitsiklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya [Variability of anticyclonic activity in the extratropical latitudes of the Northern Hemisphere], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 3, pp. 32-58, doi:10.21513/0207-2564-2019-3-32-58.

Gorbatenko, V.P., Ippolitov, I.I., Loginov, S.V., Podnebesnykh, N.V. (2009) Issledovanie tsiklonicheskoy i antitsiklonicheskoy aktivnosti na territorii Zapadnoy Sibiri po dannym reanaliza NCEP/DOE AMIP-II i sinopticheskikh kart [The study of cyclonic and anticyclonic activity in the West Siberia by NCEP/DOE AMIP-II data reanalysis and synoptic maps], *Optika atmosfery i okeana*, vol. 22(1), pp. 38-41.

Popova, V.V. (2018) Sovremennyye izmeneniya klimata na severe Yevrazii kak proyavleniye variatsiy krupnomasshtabnoy atmosfernoy tsirkulyatsii [Modern climate changes in the north of Eurasia as a manifestation of variations in large-scale atmospheric circulation], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 1, pp. 84-111, doi:10.21513/2410-8758-2018-1-84-111.

Sklyadneva, T.K., Belan, B.D., Rasskazchikova, T.M., Arshinova, V.G. (2018) Izmenenie sinopticheskogo rezhima Tomska v kontse XX – nachale XXI v. [Changes in the synoptic regime of Tomsk in the late 20th – early 21st centuries], *Optika atmosfery i okeana*, vol. 31(11), pp. 895-901, doi:10.15372/AOO20181106.

Barnes, E.A. (2013) Revisiting the evidence linking Arctic amplification to extreme weather in midlatitudes, *Geophysical Research Letters*, vol. 40, no. 17, pp. 4734-4739, doi: <https://doi.org/10.1002/grl.50880>.

Cohen, J., Saito, K., Entekhabi, D. (2001) The role of the Siberian high in Northern Hemisphere climate variability, *Geophysical Research Letters*, vol. 28, no. 2, pp. 299-302, doi: <https://doi.org/10.1029/2000GL011927>.

Ding, Y. (1990) Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia, *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 44, no. 1, pp. 281-292, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01026822>.

Francis, J.A., Vavrus, S.J. (2012) Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, no. 6, L06801, doi: <https://doi.org/10.1029/2012GL051000>.

Francis, J.A., Vavrus, S.J. (2015) Evidence for a waiver jet stream in response to rapid Arctic warming, *Environmental Research Letters*, vol. 10, no. 1, 014005, doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014005> (https://www.researchgate.net/publication/270649136_Evidence_for_a_wavier_jet_stream_in_response_to_rapid_Arctic_warming).

Hasanean, H.M., Almazroui, M., Jones, P.D., Alamodi, A.O. (2013) Siberian high variability and its teleconnections with tropical circulations and surface air temperature over Saudi Arabia, *Climate Dynamics*, vol. 41, no. 7, pp. 2003-2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1657-9>.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Thépaut, J.N. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049, doi:<https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Overland, J.E., Dethloff, K., Francis, J.A., Hall, R.J., Hanna, E., Kim, S.J., Vihma, T. (2015) The melting Arctic and midlatitude weather patterns: Are they connected? *Journal of Climate*, vol. 28, no. 20, pp. 7917-7932, doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00822.1>.

Panagiotopoulos, F., Shahgedanova, M., Hannachi, A., Stephenson, D.B. (2005) Observed trends and teleconnections of the Siberian high: A recently declining center of action, *Journal of Climate*, vol. 18, no. 9, pp. 1411-1422, doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI3352.1>.

Schiemann, R., Lüthi, D., Schär, C. (2009) Seasonality and interannual variability of the westerly jet in the Tibetan Plateau region, *Journal of Climate*, vol. 22, no. 11, pp. 2940-2957, doi:<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2625.1>.

Wu, B., Wang, J. (2002) Winter Arctic Oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon, *Geophysical Research Letters*, vol. 29, no. 19, p. 1897, doi: <https://doi.org/10.1029/2002GL015373>.

Статья поступила в редакцию (Received): 24.02.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 03.03.2026.

Принята к публикации (Accepted): 21.03.2026.

Для цитирования / For citation:

Сумерова, К.А., Хан, В.М. (2026) Многолетняя динамика характеристик Сибирского антициклона по данным реанализа (1950-2024 гг.), *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 12, № 2, с. 221-234, doi:10.21513/2410-8758-2026-2-221-234.

Sumerova, K.A., Khan, V.M. (2026) Long-term dynamics of the Siberian Anticyclone characteristics based on reanalysis data (1950–2024), *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 12, no. 2, pp. 221-234, doi:10.21513/2410-8758-2026-2-221-234.