

Н.В. ПОДНЕБЕСНЫХ

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия, podnebesnykhnv@inbox.ru

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ СВЯЗЬ С КРУПНОМАСШТАБНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ НАД СИБИРЬЮ

Изучены изменения климатических характеристик, таких как температура воздуха, атмосферное давление, количество осадков, и их связь с крупномасштабной атмосферной циркуляцией над территории Сибири, ограниченной 50–70° с. ш. и 60–110° в. д., за климатически значимый временной интервал 1976–2018 гг. При расчете рядов усредненных по территории значений приповерхностной температуры воздуха, атмосферного давления и средних сумм осадков использовались ежесуточные данные наблюдений по данным NOAA-GSOD. Определение характеристик барических образований, циклонов и антициклонов, производилось на основе приземных синоптических карт за стандартные метеорологические сроки. Установлено, что к концу исследуемого периода тренды приповерхностной температуры воздуха и количества осадков положительные, тренд атмосферного давления отрицательный. Тренд таких характеристик барических образований, как число циклонов и антициклонов, положительный, как и тренд давления в центрах антициклонов. Напротив, тренд давления в центрах циклонов отрицательный, как и тренд продолжительности воздействия циклонов и антициклонов. Показано, что наиболее резкие изменения эти тенденции претерпели в 2012–2018 гг., тогда же произошла смена знака тренда для давления в центрах антициклонов. Учитывая тесную связь между климатическими характеристиками и крупномасштабной атмосферной циркуляцией, можно утверждать, что потепление на территории Сибири до 2012 г. было обусловлено ослаблением антициклонической деятельности, а после 2012 г. — усилением циклонической.

Ключевые слова: приповерхностная температура, атмосферное давление, осадки, характеристики циклонов и антициклонов, Сибирь.

N.V. PODNEBESNYKH

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, pr. Akademicheskii, 10/3, Russia, podnebesnykhnv@inbox.ru

VARIABILITY OF CLIMATIC CHARACTERISTICS AND THEIR RELATIONSHIP TO THE LARGE-SCALE ATMOSPHERIC CIRCULATION OVER SIBERIA

The study is made of the changes in climatic characteristics, such as air temperature, atmospheric pressure and precipitation and their relationship with the large-scale atmospheric circulation over Siberia for the climatically significant time interval 1979–2018. The study area was limited to 50–70° N and 60–110° E. In calculating the series of territory-averaged values of surface temperature, atmospheric pressure and average precipitation, daily observational data from NOAA-GSOD were used. The characteristics of baric formations of cyclones and anticyclones were determined on the basis of surface synoptic maps for standard meteorological periods. It was found that by the end of the study period the trend in surface temperature and precipitation is positive, and the trend in atmospheric pressure is negative. The trend in characteristics of baric formations, such as the number of cyclones and anticyclones, is positive, as is the pressure trend in the centers of anticyclones. On the contrary, the pressure trend in the centers of cyclones is negative, as is the trend in the duration of the impact of cyclones and anticyclones. It is shown that these trends underwent the most dramatic changes during 2012–2018, with a change of sign of the trend in pressure in the centers of anticyclones. Taking into consideration the close relationship between climatic characteristics and large-scale atmospheric circulation it can be suggested that the warming in Siberia before 2012 was due to a weakening of anticyclonic activity, and after 2012 it was due to an increase in cyclonic activity.

Keywords: surface temperature, atmospheric pressure, precipitation, characteristics of cyclones and anticyclones, Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возрос интерес к региональным изменениям климата и природной среды в целом, а также к их социально-экономическим последствиям, поскольку колебания климата и его

элементов могут оказывать как негативное, так и благоприятное влияние на окружающую среду и человека [1, 2]. Регулярный мониторинг таких климатических характеристик, как приповерхностная температура воздуха, атмосферное давление, осадки, использующихся в качестве индикаторов изменения климата на местном уровне на фоне крупномасштабной атмосферной циркуляции, представляет большой интерес для исследователей, поскольку барические образования оказывают существенное влияние на погоду и климат отдельных регионов.

Изменчивость температурного поля Сибирского региона во второй половине XX в. рассматривалась в ряде работ [3–5]. На территории Сибири в условиях современного глобального потепления основной вклад в повышение среднегодовой температуры воздуха с 1970-х гг. вносили изменения среднесезонной температуры в зимний период [6–10]. Тренд межгодовой изменчивости приповерхностной температуры воздуха на территории Сибири в 1976–2012 гг. составил $0,19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, тренд среднегодового давления — $0,22\text{ гПа}/10\text{ лет}$ [11].

Количество, продолжительность и колебания количества осадков — важный и наиболее изменчивый элемент климата. Осадки играют большую роль в ослаблении оптического излучения, вызывают его существенные флуктуации, а также участвуют в формировании фоновых помех [12]. Наиболее значимые коэффициенты линейного тренда количества осадков наблюдаются в регионах Сибири весной [13]. Согласно прогнозам, сделанным с помощью ансамбля глобальных климатических моделей в рамках проекта CMIP5, в XXI в. годовые и сезонные суммы осадков увеличатся повсеместно, особенно в Арктическом регионе России [14].

Атмосферная циркуляция определяется постоянной трансформацией, образованием, развитием, перемещением и разрушением атмосферных вихрей, циклонов и антициклонов, что является причиной изменчивости и аномальности погодных условий того или иного региона. Анализ циклонической активности над территорией Сибири в 1976–2006 гг. показал, что количество преобладающих в регионе циклонов, смещающихся с севера Сибири и из районов Кольского полуострова, статистически значимо возросло, а число циклонов западного и южного направления значимо понизилось [15]. В той же работе установлено, что изменчивость атмосферной циркуляции может объяснять от 54 до 82 % изменения температуры в Сибири в различные месяцы года.

Цель настоящей работы — изучение динамики приповерхностной температуры воздуха, атмосферного давления и количества осадков и их связи с крупномасштабной атмосферной циркуляцией над территорией Сибири в период с 1979 по 2018 г., в течение которого изменился как глобальный, так и региональный климат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При расчете временных рядов усредненных по территории значений приповерхностной температуры воздуха (ПТВ), атмосферного давления и средних сумм осадков использовались ежесуточные данные архива NOAA-GSOD (noaa.gov) [16] за 1976–2018 гг. для территории Сибири, ограниченной $50\text{--}70^{\circ}$ с. ш. и $60\text{--}110^{\circ}$ в. д. Средние месячные значения климатических характеристик вычислялись на основе суточных значений по методике, описанной в [3].

В работе проводилась пространственная интерполяция рассчитанных для каждой станции сезонных значений климатических характеристик на сетку $1 \times 1^{\circ}$ по алгоритму крайгинга [17] с целью исключить влияние пространственной неоднородности расположения метеорологических станций по территории. Построение оценок, описывающих пространственное распределение величины по территории, подробно представлено в [18].

Оценка значимости трендов определялась по двустороннему t -тесту нулевой гипотезы по уровню значимости $\alpha = 0,05$. В анализе применяются выборки с разным количеством элементов и разной величиной дисперсии, что оказывает влияние на оценку величины погрешности трендов, и поэтому одно и то же значение тренда может быть при других равных условиях в одном случае значимым, а в другом — незначимым.

Исходной базой для определения характеристик циклонов и антициклонов послужили приземные синоптические карты за стандартные метеорологические сроки (00, 06, 12, 18 ч среднего гринвичского времени) за климатически значимый временной интервал 1976–2018 гг. для территории Сибири с их последующей ручной обработкой.

Ручная обработка состояла в последовательном анализе оператором 6-часовых приземных синоптических карт абсолютной барической топографии AT_{1000} . Положение барического образования определялось визуально по конфигурации первой замкнутой изобары. Циклон или антициклон при-

нимался в обработку, если его центр находился в пределах рассматриваемой территории либо располагался вне ее пределов, но его хорошо развитая периферия покрывала не менее 25 % площади региона.

Траектории движения центров барических образований внутри рассматриваемой территории не определялись, однако проводился учет направлений, с которых каждый циклон или антициклон входил в исследуемый регион. В работе рассматривались такие характеристики барических образований, как число, величина давления в их центрах и продолжительность влияния на погодные условия региона.

Характеристики циклонов были получены одним оператором. Для определения допускаемой при этом индивидуальной ошибки была применена методика, описанная в [19]. Для уменьшения высокочастотных колебаний, двух- и пятилетних, к исходным данным применяется низкочастотный фильтр с частотой обрезания, соответствующей периоду 10 лет. Это позволило выявить значимые тенденции временных изменений характеристик циклонической и антициклонической активности. Примененная в данной работе классификация циклонов и антициклонов по траекториям их вхождения на исследуемую территорию описана в [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетняя изменчивость усредненной по территории Сибири ПТВ представлена на рис. 1, а. В 1976–2018 гг. среднее многолетнее значение ее над Сибирью составило $-2,3^{\circ}\text{C}$. Многолетний ход ПТВ имеет изменчивый характер. За исследуемый период минимальное многолетнее значение температуры ПТВ составило $-3,6^{\circ}\text{C}$ (1979, 1984, 1985, 1987 гг.), максимальное $-0,6^{\circ}\text{C}$ (1995 г.), т. е. изменчивость величины равна 3°C .

Для рассматриваемого периода тренд повышения ПТВ значимый и составляет $0,3^{\circ}\text{C}/10$ лет при среднеквадратическом отклонении (σ) $0,01^{\circ}\text{C}/10$ лет (на уровне значимости $\alpha < 0,05$). Наибольший в течение года тренд роста ПТВ отмечается весной $-0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет при $\sigma = 0,16^{\circ}\text{C}/10$ лет. В остальные сезоны года он заметно меньше: зимой $-0,24^{\circ}\text{C}/10$ лет ($0,27^{\circ}\text{C}/10$ лет), летом $-0,17$ ($0,07$), осенью $-0,18^{\circ}\text{C}/10$ лет ($0,17^{\circ}\text{C}/10$ лет).

Периоды повышения температуры воздуха отражают глобальное потепление, вызванное увеличением концентрации антропогенных газов, а периоды понижения преимущественно связывают с таянием льдов в Арктике [21–23]. Потепление на территории Сибири также может быть обусловлено как ослаблением антициклонической активности, так и усилением циклонической, либо оба фактора действуют одновременно.

Усредненное по территории атмосферное давление имеет ход, не совпадающий с ходом температуры воздуха практически на всем временном промежутке (см. рис. 1, б), то же наблюдалось для периода 1958–2001 гг. [24], после 2001 г. они синхронизируются. В рассматриваемый период тренд понижения давления незначим и составляет $-0,15$ гПа/10 лет при $\sigma = 0,15$ гПа/10 лет. Отметим, что, в отличие от остальных сезонов года, в зимнее время тренд атмосферного давления положительный ($0,23$ гПа/10 лет при $\alpha = 0,48$ гПа/10 лет). Это говорит о том, что зимой давление растет под влиянием Сибирского антициклона, господствующего в это время года над изучаемой территорией. В остальные сезоны тренд отрицательный, наиболее высок он весной $-0,84$ гПа/10 лет ($\sigma = 0,20$ гПа/10 лет), летом $-0,16$ ($0,13$), осенью $-0,04$ гПа/10 лет ($0,24$ гПа/10 лет). В теплый период года на ход атмосферного давления влияют уменьшение контраста температур, а также интенсивные процессы цикло- и антициклогенеза.

Многолетняя динамика усредненного по территории количества осадков представлена на рис. 1, в. Хорошо видно, что количество осадков на территории Сибири имеет большую изменчивость от года к году, за весь период исследования отмечается положительный незначимый тренд $0,12$ мм/10 лет при $\sigma = 0,47$ мм/10 лет.

Для Сибири многолетний ход количества осадков повторяет тенденцию многолетнего хода числа циклонов [25] (рис. 2, а), т. е. в периоды увеличения количества осадков над изучаемой территорией господствует циклоническая погода, а при их уменьшении антициклоническая, что вполне закономерно. С 2012 по 2018 г. произошло особенно заметное увеличение количества осадков, также в данный период возросло число барических образований. Основной вклад в это увеличение вносят циклоны, смещающиеся по северным, северо-западным траекториям движения, и антициклоны, смещающиеся по западным траекториям, стационарирующие над Уралом [20] и тем самым блокирующие движение циклонов с данного направления, но в то же время позволяющие поступать на изучаемую территорию большему числу циклонов с других направлений.

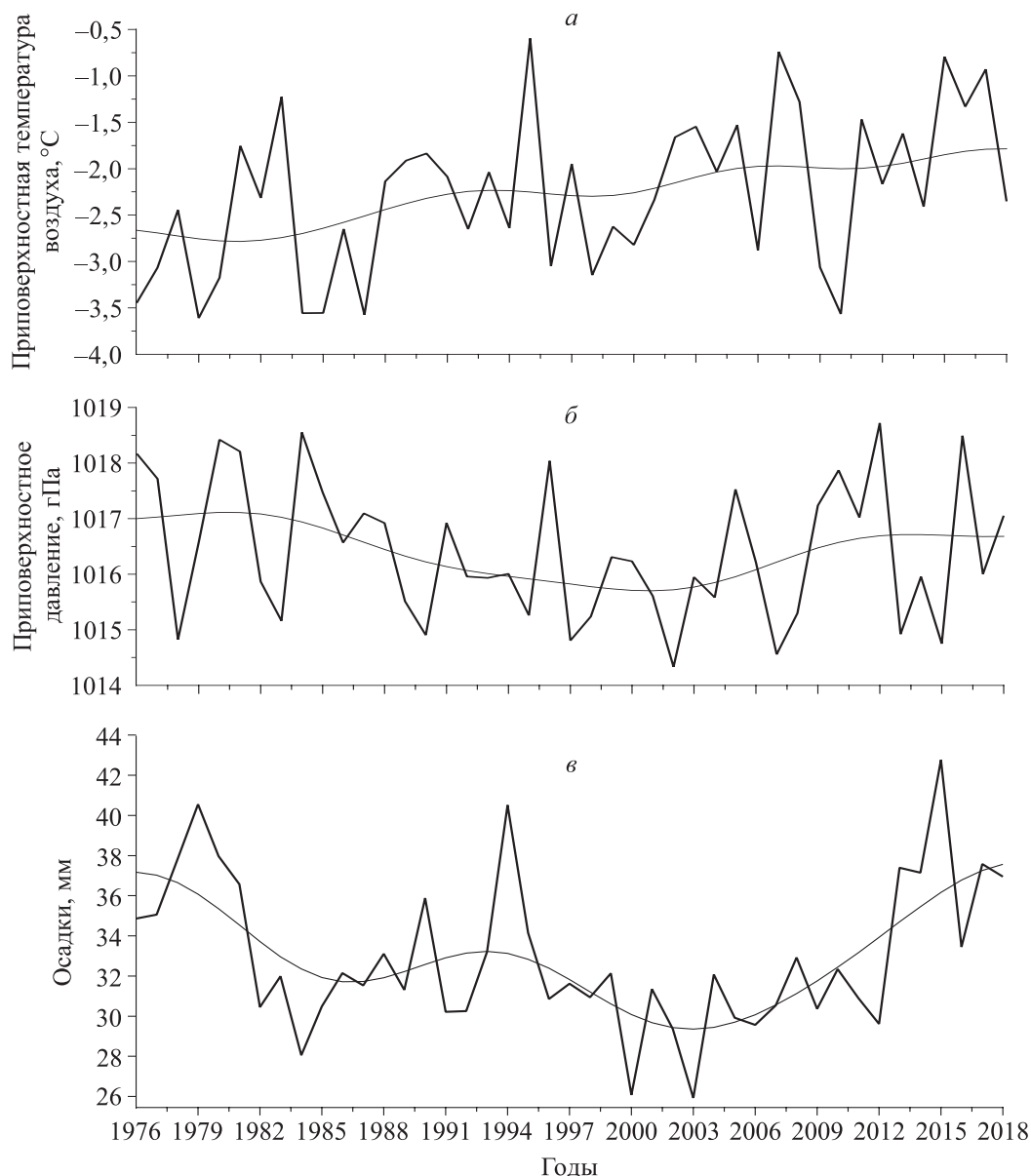


Рис. 1. Многолетняя динамика среднегодовой приповерхностной температуры воздуха (а), атмосферного давления (б) и количества осадков (в) на территории Сибири за 1976–2018 гг.

Плавная сплошная линия — сглаженные 10-летним окном значения.

Рассмотрим подробнее тот факт, что потепление в Сибири может быть обусловлено как усилением циклонической, так и ослаблением антициклонической активности, либо оба эти фактора действуют одновременно, о чем было сказано выше. С 1976 по 2018 г. над территорией Сибири отмечено 2315 циклонов и 1827 антициклонов (см. таблицу), среднегодовое число циклонов составляет 55,1, антициклонов — 44,5 (см. рис. 2, а).

Изучение данных, приведенных в таблице, показывает, что максимальное число циклонов приходит на изучаемую территорию по северо-западным траекториям движения (563 циклона за 42 года, при среднем годовом значении 13,4 циклона), а минимальное — по южным (245 циклонов за 42 года, при среднем годовом значении 5,8 циклона). Максимальное число антициклонов приходит по западным (450 циклонов за 42 года, при среднем годовом значении 10,7 антициклона), минимальное по северо-западным траекториям движения (211 циклонов за 42 года, при среднем годовом значении 5 антициклонов).

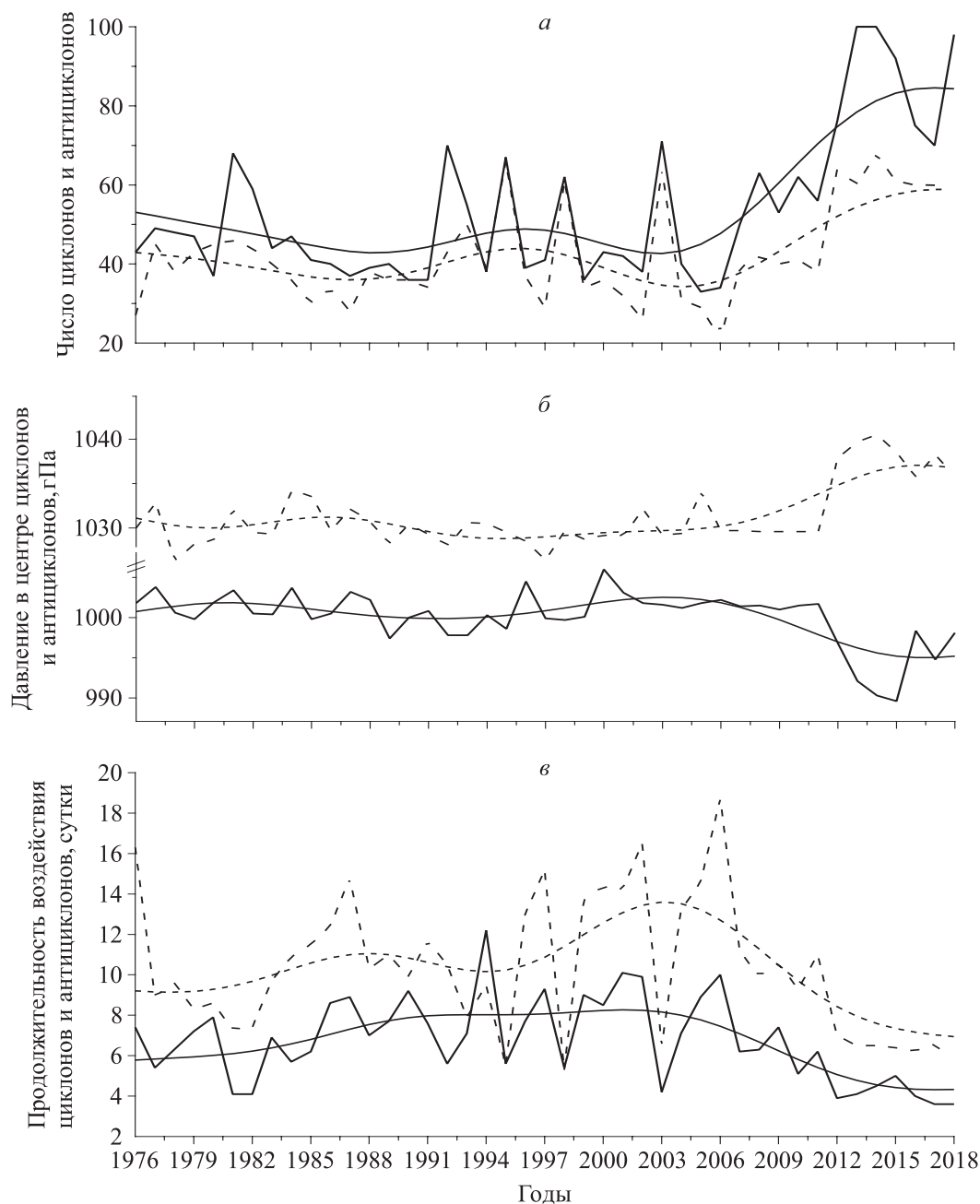


Рис. 2. Среднегодовое число циклонов и антициклонов (*a*), среднее многолетнее давление в центрах циклонов и антициклонов (*б*) и продолжительность воздействия циклонов и антициклонов (*в*) на погодные условия Сибири за 1976–2018 гг.

Жирной сплошной линией показаны значения для циклонов, штриховой кривой — для антициклонов. Плавные сплошная и штриховая линии — сглаженные 10-летним окном значения.

По данным приземных синоптических карт для многолетнего числа барических образований, отмечается положительный значимый тренд (8,3 циклона/10 лет при $\sigma = 1,9$ циклона/10 лет и 4 антициклона/10 лет при $\sigma = 1,4$ циклона за 10 лет). Наибольший вклад в увеличение общего числа циклонов и антициклонов вносят северо-западные и западные барические образования соответственно.

Максимум во внутригодовом ходе повторяемости циклонов и антициклонов над территорией Сибири наблюдается в мае и апреле; минимум — в июле и январе соответственно. Максимум повторяемости барических образований в весенний период может быть обусловлен усилением вихревой

Многолетние значения числа (n), среднего давления в центре (P_c) и средней продолжительности (T) циклонов и антициклонов, приходящих на территорию Сибири по различным траекториям движения в 1976–2018 гг.

Показатель	Циклоны						Антициклоны				
	С	СЗ	З	ЮЗ	Ю	местные	С	СЗ	З	ЮЗ	ЮВ
n	343	563	512	281	245	371	396	211	450	346	424
P_c , гПа	995,6	993,3	998,3	1000,1	1002,3	1011,1	1029,5	1031,5	1028,9	1030,1	1036,3
T , сут	5,8	7,4	5,8	5,2	4,2	3,1	8,1	8,4	9,2	7,1	7,5

Примечание. Траектории движения: С — северные, СЗ — северо-западные, З — западные, ЮЗ — юго-западные, Ю — южные, ЮВ — юго-восточные.

деятельности вследствие больших контрастов температуры над Сибирью и, как следствие, увеличением повторяемости циклонов и антициклонов, что согласуется с работой [26]. Также в июле отмечается минимум скорости перемещения циклонов, что объясняет их наименьшую повторяемость [27]. Минимум повторяемости антициклонов в январе связан с активной деятельностью Сибирского антициклона — обширного стационарного барического образования.

Отметим, что в 2012–2018 гг. уменьшилась разница между повторяемостью циклонов и антициклонов, что согласуется с работой, в которой приводятся данные для района Томска [28].

Изучение многолетней изменчивости атмосферного давления в центрах барических образований показало, что его среднее многолетнее значение в центрах циклонов в 1976–2018 гг. составляет 1000,1 гПа (варьируя в пределах 989,6–1006,0 гПа), в центрах антициклонов — 1031,3 гПа (1026,3–1040,5 гПа) (см. рис. 2, б, см. таблицу).

За весь период исследования наиболее глубокими являются циклоны с северо-западными траекториями движения (со средним многолетним значением 993,3 гПа), наименее глубокими — местные циклоны (1011,1 гПа). Местные циклоны являются неглубокими барическими образованиями с небольшой продолжительностью существования, поэтому минимальное давление в их центрах закономерно. Максимальное давление характерно для антициклонов с юго-восточными траекториями движения (со средним многолетним значением 1036,3 гПа), минимальное — для западных антициклонов (1028,9 гПа).

На рис. 2, б хорошо видно, что в последние годы давление в центрах циклонов снижается, а в центрах антициклонов растет, что, в частности, сменило направление тренда с отрицательного на положительный для давления в центрах антициклонов. Отсюда можно сделать вывод, что до 2012 г. рост ПТВ на территории Сибири был обусловлен ослаблением антициклонической деятельности, а после 2012 г. — усилением циклонической. Интерпретация данных показала, что в 2012–2018 гг. основной вклад в углубление циклонов вносят северо-западные вихри, а в интенсификацию антициклонов — юго-восточные.

По данным приземных синоптических карт, тренд среднего многолетнего давления в центрах циклонов отрицательный значимый ($-1,2$ гПа/10 лет при $\sigma = 0,4$ гПа/10 лет), наибольший вклад в который вносят северо-западные циклоны. Средний многолетний тренд давления в центрах антициклонов положительный значимый ($1,4$ гПа/10 лет при $\sigma = 0,4$ гПа/10 лет), максимальный вклад в него вносят юго-восточные антициклоны.

Внутригодовой ход давления в центрах барических образований показал, что наиболее глубокими циклоны являются в летний период, наименее — в весенне-осенний. Максимальной интенсивностью антициклоны отличаются зимой, минимальной — летом. Интенсификация антициклонов в зимний сезон, как уже было отмечено, обусловлена господством Сибирского антициклона над изучаемой территорией в данное время года [29], а усиление циклонов в летний сезон — интенсивным циклогенезом в этот период [26].

Обработка и анализ данных о продолжительности воздействия барических образований на погодные условия Сибири показали, что средняя многолетняя продолжительность существования циклона составляет 7 сут, антициклона — 10 сут (см. рис. 2, в). Среднегодовая продолжительность воздействия циклонов на погодные условия исследуемой территории меньше, чем продолжительность антициклонов, т. е. в течение года антициклональная погода наблюдалась над территорией Сибири чаще, чем циклоническая (см. таблицу).

Наиболее продолжительными за изучаемый период являются циклоны, смещающиеся по северо-западным траекториям движения (7,4 сут), и западные антициклоны (9,2), наименее продолжительны местные циклоны (3,1) и юго-западные антициклоны (7,1 сут).

Продолжительность барических образований в последние годы заметно уменьшилась, т. е. и циклоны, и антициклоны стали более кратковременными (см. рис. 2, в). Увеличение количества циклонов и антициклонов, уменьшение давления в центрах циклонов и смена знака тренда давления в центрах антициклонов позволяют сделать вывод о дестабилизации климатической системы в 2012–2018 гг., вследствие чего экстремальные погодные явления могут наблюдаться чаще [30–32].

По данным приземных синоптических карт, тренд средней многолетней продолжительности как циклонов, так и антициклонов отрицательный незначимый ($-0,4$ сут/10 лет при $\sigma = 0,3$ сут/10 лет и $-0,5$ сут/10 лет при $\sigma = 0,4$ сут/10 лет соответственно). Наибольший вклад в уменьшение продолжительности влияния барических образований на погодные условия изучаемой территории вносят местные и юго-западные антициклоны.

Как показало сезонное распределение продолжительности барических образований, наименее продолжительны циклоны весной (4,8 сут), наиболее — летом (5,7 сут). Антициклоны наименее продолжительны летом (7,2 сут), наиболее — зимой (9,4 сут). Весенний минимум в продолжительности циклонов объясняется неустойчивостью атмосферной циркуляции в переходные сезоны года и быстрой сменой одного барического образования другим. Зимний максимум в продолжительности антициклонов обусловлен господством мощного стационарного Сибирского антициклона над изучаемой территорией.

Таким образом, наиболее выраженные характеристики имеют северо-западные циклоны (наибольшая повторяемость и продолжительность, минимальное давление в их центрах). Максимальной повторяемостью и продолжительностью воздействия на погодные условия изучаемой территории отличаются западные антициклоны, а наибольшее давление отмечается в центрах юго-восточных антициклонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показали наличие связи между изменением климатических характеристик и крупномасштабной атмосферной циркуляцией над территорией Сибири в 1976–2018 гг. Каждый рассмотренный в работе элемент циркуляции атмосферы тесно связан с климатическими характеристиками и влияет на них. На территории исследования наблюдались рост ПТВ, падение атмосферного давления и увеличение средних сумм осадков, что было обусловлено характером атмосферной циркуляции в 1976–2018 гг. над территорией Сибири.

Особо выделяются 2012–2018 гг., на протяжении которых число барических образований увеличилось, при этом их продолжительность резко уменьшилась, давление в центрах циклонов снизилось, а тренд давления в центрах антициклонов сменил знак, что демонстрирует нестабильность климатической системы в данный период. Таким образом, до 2012 г. рост ПТВ на территории Сибири был обусловлен ослаблением антициклонической деятельности, а после 2012 г. — усилением циклонической.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания (121031300154–1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов А.В., Блинов В.Г., Голицын Г.С., Дымников В.П., Израэль Ю.А., Катцов В.М., Котляков В.М., Осипов В.И., Семенов С.М. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. — М.: Росгидромет, 2014. — 58 с.
2. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. — 996 p.
3. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Харюткина Е.В. Структура и динамика метеорологических полей на азиатской территории России в период интенсивного глобального потепления 1975–2005 гг. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер. Биология. — 2008. — Т. 1, № 4. — С. 323–344.
4. Кабанов М.В. Некоторые закономерности климатических и экосистемных изменений в Сибири // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер. Биология. — 2008. — Т. 1, № 4. — С. 312–322.
5. Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Изменение климата на азиатской территории России во второй половине XX столетия: сравнение данных наблюдений и реанализов // Оптика атмосферы и океана. — 2006. — Т. 19, № 11. — С. 934–940.
6. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменение климата / Отв. ред. В.П. Мелешко. — М.: Росгидромет, 2008. — 227 с.
7. Харламова Н.Ф. Долговременные климатические изменения на внутриконтинентальной территории России (Алтайский регион) // Изв. Алт. ун-та. — 2010. — Т. 3, № 1. — С. 133–140.

8. Харюткина Е.В., Логинов С.В., Усова Е.И., Мартынова Ю.В., Пустовалов К.К. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX–начале XXI в. // *Фундам. и прикл. климатология*. — 2019. — № 2. — С. 45–65.
9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. — М.: Росгидромет, 2021. — 104 с.
10. Поднебесных Н.В., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. Связь климатических характеристик с циклонической активностью в зимний период над Сибирью в 1976–2011 гг. // *Оптика атмосферы и океана*. — 2016. — Т. 29, № 8. — С. 617–624.
11. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет, 2014. — 1008 с.
12. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. Оптическая погода. — Новосибирск: Наука, 1990. — 191 с.
13. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environmental Research Letters*. — 2019. — Vol. 14. — P. 045001.
14. Kokorev V.A., Sherstiukov A.B. Meteorological data for studying the current and projected for the future climate change in Russia // *Arct. 21st Century. Environmental Science*. — 2015. — Vol. 2. — P. 5–23.
15. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Поднебесных Н.В., Харюткина Е.В. Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. — 2011. — Т. 24, № 1. — С. 15–21.
16. Global Surface Summary of the Day – GSOD // NOAA [Электронный ресурс]. — <https://www.noaa.gov/> (дата обращения 18.11.2021).
17. Cressie N.A. The Origins of Kriging // *Mathematical Geology*. — 1990. — Vol. 22, N 3. — P. 239–252.
18. Мэйндоналд Дж. Вычислительные алгоритмы в прикладной статистике / Пер с англ. — М.: Финансы и статистика, 1988. — 350 с.
19. Чемякова Е.Т., Болтовская М.А., Логинов С.В., Пахмистерова М.В., Терскова Н.С. Изменчивость вихревой активности на азиатской территории России в конце XX и начале XXI в. // *Десятое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу*. — Томск: Аграф-Пресс, 2013. — С. 157.
20. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В. Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью в 1976–2004 гг. // *Метеорология и гидрология*. — 2007. — № 5. — С. 28–36.
21. Harvey B.J., Shaffrey L.C., Woollings T.J. Equator-to-pole temperature differences and the extra-tropical storm track responses of the CMIP5 climate models // *Climate Dynamics*. — 2014. — Vol. 43, N 5–6. — P. 1171–1182.
22. Ulbrich U., Leckebusch G.C., Pinto J.G. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review // *Theoretical and Applied Climatology*. — 2009. — Vol. 96, N 1–2. — P. 117–131.
23. Gulev S.K., Zolina O., Grigoriev S. Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from NCEP/NCAR reanalysis data // *Climate Dynamics*. — 2001. — Vol. 17. — P. 795–809.
24. Wang X., Swail V., Zwiers F. Climatology and changes of extratropical cyclone activity: comparison of ERA40 with NCEP/NCAR reanalysis for 1958–2001 // *Journ. of Climate*. — 2006. — Vol. 19, N 13. — P. 3145–3166.
25. Feser F., Barcikowska M., Krueger O., Schenk F., Weisse R., Xia L. Storminess over the North Atlantic and North-western Europe: A review // *Meteorological Society*. — 2015. — Vol. 141, N 687. — P. 350–382.
26. Погосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 396 с.
27. Бордовская Л.И., Цибульский А.Е. Повторяемость и скорость движения циклонов и антициклонов над Западной Сибирью // *Вопросы географии Сибири*. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1976. — Вып. 9. — С. 22–29.
28. Складнева Т.К., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Аршинова В.Г. Изменение синоптического режима Томска в конце XX–начале XXI в. // *Оптика атмосферы и океана*. — 2018. — Т. 31, № 11. — С. 895–901.
29. Поднебесных Н.В., Ипполитов И.И. Связь климатических характеристик с антициклонической активностью в зимний период над Сибирью в 1976–2011 гг. // *Оптика атмосферы и океана*. — 2019. — Т. 32, № 12. — С. 965–970.
30. Мохов И.И., Семенов В.А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах и их связь с глобальными изменениями климата // *Метеорология и гидрология*. — 2016. — № 2. — С. 16–28.
31. Хлебникова Е.И., Рудакова Ю.Л., Школьник И.М. Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // *Метеорология и гидрология*. — 2019. — № 7. — С. 5–16.
32. Голицын Г.С., Васильев А.А. Изменение климата и его влияние на частоту экстремальных гидрометеорологических явлений // *Метеорология и гидрология*. — 2019. — № 11. — С. 9–12.

Поступила в редакцию 23.03.2022

После доработки 06.05.2022

Принята к публикации 05.07.2022