

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-55-76>

УДК 551.513.3

Статистические оценки параметров центров действия атмосферы в зимнем и летнем сезонах по данным реанализа за период 1992–2021 годов

***V.S. Balakin¹, Yu.V. Shipko¹, O.V. Kolychev¹,
I.E. Kyznetsov², V.P. Zakusilov², E.V. Shuvakin²***

*¹Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил
(Минобороны России), г. Москва, Россия;*

*²Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина
(Минобороны России), г. Воронеж, Россия
yshipko@mail.ru*

Исследуются климатологические центры действия атмосферы (постоянные и сезонные) Северного и Южного полушарий для центральных месяцев зимнего и летнего сезонов. В качестве исходной информации использованы данные геопотенциальной высоты изобарического уровня 1000 гПа архива реанализа параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II за 1992–2021 гг. Программно-реализованная обработка многолетних данных файлов реанализа позволила отобразить на карте распределения повторяемости «синоптических» центров действия в узлах регулярной сетки (с шагом 2,5° по широте и долготе). Представлены статистические оценки параметров центров действия атмосферы (местоположения, интенсивности), в том числе характеристики эллипсов рассеяния. Дан анализ изменения характеристик в сравнении с базовым климатическим периодом 1961–1990 гг. (по данным реанализа NCEP/NCAR). Показана динамика характеристик центров действия в виде скользящих 10-летних средних за период 2000–2021 гг.

Ключевые слова: центр действия атмосферы, реанализ, геопотенциальная высота, эллипс рассеяния, скользящая средняя, тенденция

Statistical estimates of the parameters of winter and summer atmospheric centers of action based on 1992–2021 reanalysis

***V.S. Balakin¹, Yu.V. Shipko¹, O.V. Kolychev¹,
I.E. Kyznetsov², V.P. Zakusilov², E.V. Shuvakin²***

*¹Central Scientific Research Institute of Air Force
(RF Ministry of Defense), Moscow, Russia;*

*²Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin
(RF Ministry of Defense), Voronezh, Russia
yshipko@mail.ru*

The subject of the present study is climatological atmospheric centers of action (permanent and seasonal) of the Northern and Southern hemispheres for the central months of the winter and summer seasons. Data on 1000 hPa geopotential height from the

NCEP/DOE AMIP-II reanalysis of atmospheric parameters for 1992-2021 are used as initial information. Software-implemented processing of long-term reanalysis data files made it possible to map of the distribution of synoptic centers of action at regular grid points (with a step of 2.5° in latitude and longitude). Statistical estimates of the parameters of atmospheric centers of action (location and intensity), including concentration ellipse characteristics, are presented. An analysis of the change in the characteristics as compared to the base climate period of 1961–1990 (according to the NCEP/NCAR reanalysis data) is given. The dynamics of the characteristics of the centers of action in the form of moving 10-year averages for 2000–2021 is demonstrated.

Keywords: atmospheric center of action, reanalysis, geopotential height, concentration ellipse, moving average, trend

Введение

Предметом исследования являются климатологические центры действия атмосферы (ЦДА) – области повышенного или пониженного давления на уровне моря на многолетних средних картах по сезонам либо за год. ЦДА являются статистическим результатом преобладания в определенном районе барических объектов атмосферы одного и того же знака.

В настоящее время многие работы в области исследования общей циркуляции атмосферы, оценки климатических изменений, долгосрочного прогнозирования проводятся с учетом характеристик ЦДА [1, 6, 9]. Раскрывается природа ЦДА, рассматриваются факторы, обуславливающие их образование [10, 13, 15]. Анализируется влияние состояния ЦДА на погодно-климатические региональные особенности различных территорий [16]; рассматриваются долгопериодные изменения повторяемости циклонической [3, 5] и антициклонической [4] активности в регионах Северного полушария, их отклик на моды атмосферной циркуляции атлантико-европейского сектора. Оценивается связь характеристик ЦДА с приповерхностной температурой Северного и Южного полушарий, в частности с ключевыми климатическими модами (атлантической мультидесятилетней осцилляцией Эль-Ниньо, Ла-Нинья) [12, 13]. Кроме того, прогнозируются климатические изменения параметров ЦДА при глобальном потеплении [11], моделируются по различным сценариям тенденции их изменений до конца столетия (с помощью ансамбля CMIP5) [22]. Таким образом, работы по тематике исследований ЦДА не теряют актуальности.

Целью данного исследования является оценка характеристик ЦДА на материале последнего тридцатилетия, что актуально для современного периода климатических изменений, имеет методическое значение для решения прикладных задач метеорологии.

В работе рассматриваются перманентные (постоянные) ЦДА Северного и Южного полушарий, а также основные сезонные ЦДА. Не учитывались климатологические барические образования, не имеющие выраженного центра: экваториальная и предантарктическая зоны пониженного давления, а также арктический антициклон.

Исходный материал и методика расчета

Исходным материалом в исследованиях ЦДА служат синоптические карты давления на уровне моря, или поля средних месячных значений давления [2, 15, 20], или «сеточные» архивы, являющиеся результатом резервного объективного анализа (реанализа) «станционных» данных [11–13, 23, 24]. В данной работе в качестве исходной информации использовались поля среднесуточных значений геопотенциальной высоты в узлах регулярной сетки с шагом $2,5^\circ$ по широте и долготе на изобарическом уровне 1000 гПа за январь и июль – данные реанализа параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II [23] за 30-летний период (1992–2021 гг.). Выбор материала NCEP/DOE обоснован тем, что опыт сопоставления данных различных реанализов (ERA-Interim, ERA5, JRA55, NCEP [21]) показывает разумную успешность для параметров в средней тропосфере. Как показано в исследованиях [13, 21, 25], качество данных проекта NCEP/DOE AMIP-II для атмосферного давления на уровне 1000 гПа имеет удовлетворительную успешность и, следовательно, данный источник информации может быть использован для исследования ЦДА (постоянных и сезонных) обоих полушарий.

В целях сравнения соответствующих статистических оценок характеристик ЦДА с предыдущим временным периодом, использованы файлы реанализа NCEP/NCAR [24], который включает архивы данных базового климатического периода 1961–1990 годов.

Обработка файлов реанализа геопотенциальной высоты (формата hgt.*.nc), расчет статистических характеристик и графическое отображение «синоптических» центров ЦДА на карте проведены с помощью специально разработанной программы (на языке Python).

Для идентификации циклонов/антициклонов и расчета их характеристик используется упрощенный подход [5]: нахождение точки экстремума H_{oj} (максимума или минимума, в зависимости от ЦДА) в определенных (условных) границах районов для дискретного поля H_{1000} за каждый день расчетного месяца; данная точка принимается за «синоптический» ЦДА, определяется широта и долгота центра (φ_i, λ_j) . Принадлежность выявленного экстремума к тому или иному ЦДА определяется по географическому району возникновения. Если встречается два и более равных значения экстремумов, то учитывается только одна точка H_{oj} , расположенная ближе к центральной части района соответствующего ЦДА (в расчете такие случаи встречались крайне редко).

Предусматривается формирование многомерных массивов значений $H_{oj}, \varphi_i, \lambda_j$ по месяцам (январь, июль) за каждый год периода 1992–2021 гг. Проводится расчет статистических характеристик за январь, июль (для периода 1992–2021 гг. и за десятилетия: 1992–2001, 1993–2002, ..., 2012–2021 гг.):

– средних и средних квадратических отклонений: $\bar{\varphi}$, $\bar{\lambda}$, \bar{H}_0 , σ_φ , σ_λ ; величины σ_φ , σ_λ переведены в километры (условно принято для градуса параллели и меридиана $1^\circ \approx 100$ км);

– геометрических характеристик эллипса рассеяния с центром $(\bar{\varphi}, \bar{\lambda})$: площади $S = \pi \sigma_x \sigma_y$; коэффициента сжатия $k = \sigma_y / \sigma_x$, где σ_x, σ_y – главные средние квадратические отклонения $\sigma_{x/y}^2 = \frac{1}{2}(\sigma_\lambda^2 + \sigma_\varphi^2 \pm \sqrt{(\sigma_\lambda^2 - \sigma_\varphi^2)^2 + 4r^2 \sigma_\lambda^2 \sigma_\varphi^2})$, характеризующие рассеивание вдоль осей x, y системы координат, полученной поворотом системы λ, φ на угол α , $\text{tg } 2\alpha = 2r\sigma_\varphi\sigma_\lambda / (\sigma_\lambda^2 - \sigma_\varphi^2)$.

Распределения повторяемости синоптических центров в узлах регулярной сетки для января и июля (1992–2021 гг.) отображаются на карте в автоматизированном режиме.

Следует отметить, что статистические характеристики ЦДА зависят от выбранных размеров районов расположения. Для охвата более обширной территории исследования сначала рассматривались районы ЦДА с подвижными границами, т. е. программный модуль вычислений максимума/минимума дискретных полей геопотенциальной высоты был построен так, что при остановке цикла поиска на границе района (по широте или долготе) добавлялись шаги ($2,5^\circ$), пока точка H_{oij} оказывалась внутри границ района положения ЦДА. Однако подобный подход не был принят, поскольку в зону одного ЦДА попадали центры другого. Например, как показано на рис. 1, в июле кластер рассчитанных синоптических центров Гренландского антициклона над Баренцевым и Норвежским морями можно отнести к арктическому антициклону.

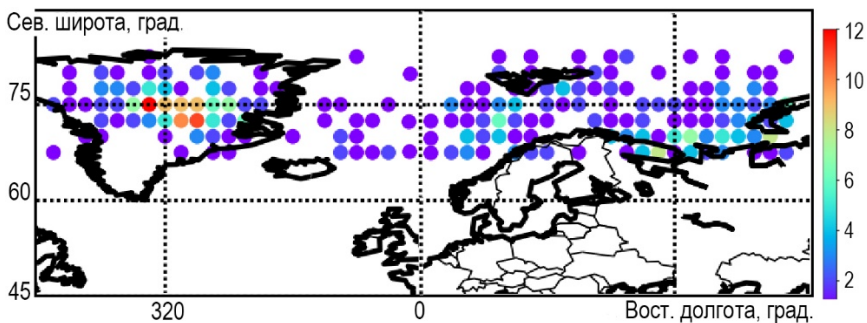


Рис. 1. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Гренландского антициклона в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг., июль). Вариант автоматизированного расчета с подвижной границей района.
Fig. 1. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Greenland highs at regular grid nodes (1992–2021, July). Option of calculation with mobile boundary of the area.

Разделение районов ЦДА в таких случаях затруднительно (пояс экстремумов полей геопотенциальной высоты может быть непрерывным, и их отнесение к тому или иному ЦДА является условным), поэтому далее в работе приняты постоянные границы районов (приведены в представленной ниже таблице).

Характеристики ЦДА периода 1992–2021 гг.

Результатам расчета оценок характеристик ЦДА периода 1992–2021 гг. (табл. 1) можно дать следующую интерпретацию.

Общая повторяемость центров (p , %) в рассматриваемых районах показывает, что наиболее устойчивыми, когда чаще наблюдаются циклонические/антициклонические объекты (с повторяемостью $p > 90$ %), являются барические образования: в январе – Алеутской, Исландской депрессий, Сибирского, Южно-Тихоокеанского, Южно-Атлантического и Южно-Индийского максимумов; в июле – Южно-Азиатской депрессии, Азорского и Северо-Тихоокеанского (Гонолульского) антициклонов.

Наибольшую площадь эллипса рассеивания (более 5 млн км²) имеют в январе Азорский максимум и Австралийский минимум; наименьшая площадь эллипса у Южно-Азиатской (термической) депрессии в июле (менее 1 млн км²).

Сравнение «мощностей» ЦДА представлено в виде диаграммы их средней за многолетний месяц геопотенциальной высоты \bar{H}_0 изобарического уровня 1000 гПа (рис. 2). Как следует из рис. 2а, на этом изобарическом уровне в январе наибольшей «мощностью» обладает Сибирский максимум (33,5 дам), глубокие области пониженного давления имеют Алеутский и Исландский минимумы (~ –19 дам). В июле (рис. 2б) климатические антициклоны (кроме Гренландского) близки по интенсивности (24–27 дам).

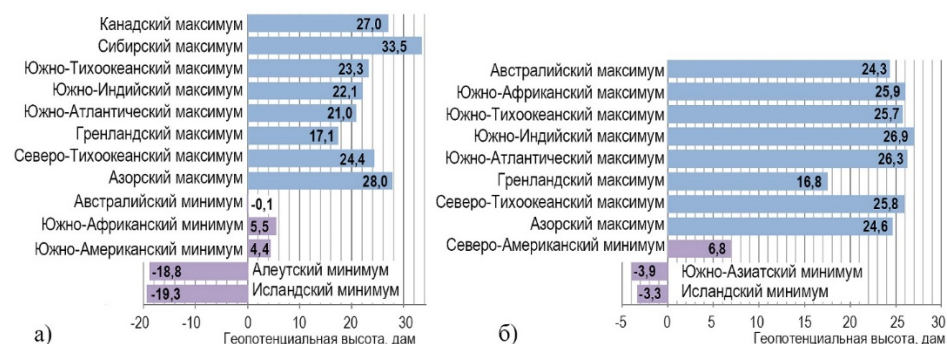


Рис. 2. Средние значения геопотенциальной высоты ЦДА (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 2. Mean geopotential heights COA (1992–2021): January (a), July (b).

Таблица 1. Статистические характеристики ЦДА (1992–2021 гг.)
Table 1. Statistical characteristics of Atmospheric Centers of Action (1992–2021)

ЦДА	Месяц	В границах		$\rho, \%$	$\bar{\varphi}, ^\circ$	$\bar{\lambda}, ^\circ$	$\sigma_{\varphi},$ км	$\sigma_{\lambda},$ км	$S,$ млн км ²	k
		$\varphi, ^\circ$	$\lambda^*, ^\circ$							
Северное полушарие										
<i>Перманентные</i>										
Азорский максимум	январь	20...60	290...20	80,1	40,8	340,0	800	2030	5,1	0,39
	июль	20...60	290...20	98,2	38,8	324,5	590	1310	2,4	0,45
Исландский минимум	январь	45...75	270...360	91,4	60,2	327,5	600	2050	3,5	0,26
	июль	45...75	250...340	75,6	59,1	293,7	620	2360	4,6	0,26
Северо-Тихоокеанский максимум	январь	20...50	140...240	58,9	35,0	210,4	600	2400	4,5	0,25
	июль	20...50	140...240	96,7	39,9	204,1	390	1340	1,6	0,28
Гренландский максимум	январь	65...85	280...360	38,4	74,2	324,7	370	1440	1,7	0,25
	июль	65...85	280...360	49,0	74,1	334,5	390	2020	2,4	0,19
<i>Сезонные</i>										
Алеутский минимум	январь	35...70	130...240	98,6	50,4	186,4	580	2030	3,6	0,28
	январь	25...70	50...140	91,5	47,1	94,1	840	1380	3,6	0,61
Канадский максимум	январь	30...60	240...290	69,5	43,2	258,1	630	1320	2,6	0,47
	июль	15...45	240...280	31,7	33,9	255,2	780	840	1,9	0,64
Южно-Азиатский минимум	июль	10...45	30...90	99,6	26,2	64,5	300	1060	0,9	0,24

ЦДА	Месяц	В границах		$\rho, \%$	$\bar{\varphi}, ^\circ$	$\bar{\lambda}, ^\circ$	$\sigma_{\varphi},$ км	$\sigma_{\lambda},$ км	S, млн км ²	k
		$\varphi, ^\circ$	$\lambda^*, ^\circ$							
Южное полушарие										
<i>Перманентные</i>										
Южно-Тихоокеанский максимум	январь	-15...-50	200...290	93,5	-37,7	245,4	460	2010	2,7	0,21
	июль	-15...-50	200...290	79,9	-35,7	250,5	560	2110	3,7	0,26
Южно-Атлантический максимум	январь	-15...-50	290...10	95,2	-35,0	344,0	450	1600	2,3	0,28
	июль	-15...-50	290...10	83,1	-34,0	338,7	520	2000	3,3	0,26
Южно-Индийский максимум	январь	-15...-50	40...110	93,4	-37,0	76,8	370	1570	1,7	0,22
	июль	-15...-50	40...110	83,7	-33,8	69,2	360	1630	1,8	0,22
<i>Сезонные</i>										
Южно-Американский минимум	январь	0...-45	280...320	31,1	-26,1	302,3	870	560	1,5	0,62
Южно-Африканский минимум	январь	15...-45	0...40	20,9	-16,9	24,4	1530	740	3,5	0,48
Южно-Африканский максимум	июль	15...-45	0...40	34,1	-31,6	19,3	400	1160	1,4	0,32
Австралийский минимум	январь	-10...-45	110...180	44,1	-23,8	144,5	880	2000	5,5	0,44
Австралийский максимум	июль	-15...-50	110...180	72,7	-35,7	145,6	530	1660	2,7	0,31

Примечание. λ – долгота восточная.

На рис. 3–14 представлены распределения синоптических центров рассматриваемых ЦДА на картах районов функционирования, показаны повторяемости в узлах регулярной сетки максимумов/минимумов полей геопотенциальной высоты уровня 1000 гПа. В результате совместного анализа этих рисунков и данных табл. 1 можно сформулировать особенности каждого ЦДА в январе и июле.

Азорский максимум в январе, кроме своего обычного положения, имеет повторяемость синоптических центров на западной части Европы и северной части Африки (рис. 3а), что не отмечается в июле (рис. 3б). За счет этой особенности в январе велики среднее квадратическое отклонение по долготе и площадь эллипса рассеяния (см. табл. 1).

Значительное смещение среднего центра на запад от января к июлю (почти на 30° долготы) имеет Исландская депрессия (рис. 4, табл. 1). Если в январе минимумы депрессии располагаются на севере Атлантики, то в июле (в основном) – на восточной части Канады.

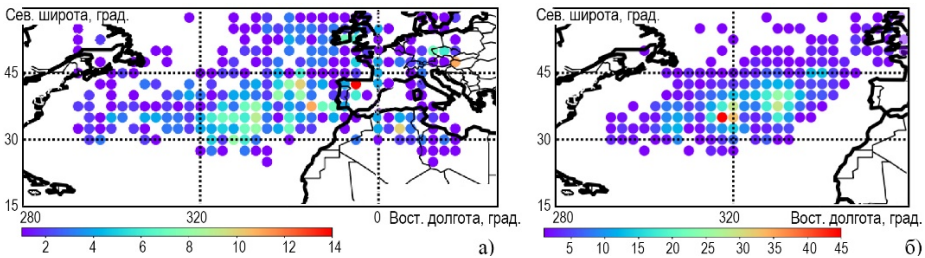


Рис. 3. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Азорского максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 3. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Azores high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (б).

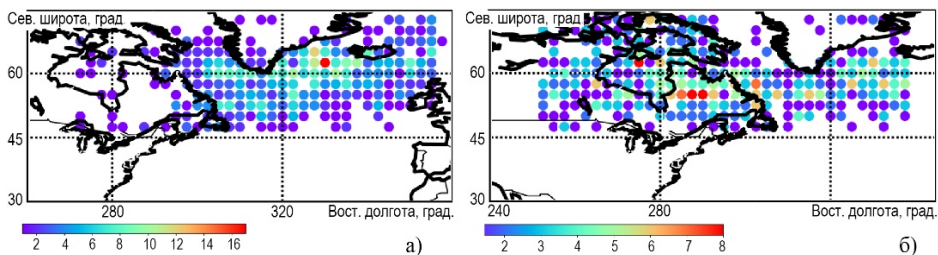


Рис. 4. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Исландской депрессии в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 4. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Icelandic Low at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (б).

Средний центр Северо-Тихоокеанского антициклона также подвержен смещению от января к июлю – на северо-запад; при этом площадь его эллипса рассеяния уменьшается более чем в два раза (рис. 5, табл. 1).

Центр Гренландского антициклона от января к июлю несколько смещается в восточном направлении (рис. 6, табл. 1).

Алеутская депрессия и Сибирский антициклон имеют равные площади эллипсов рассеяния центров, однако коэффициенты сжатия различаются в два раза (табл. 1), что прослеживается по отображениям на рис. 7, 8а. Центры Сибирского максимума наблюдаются и на Урале, и на юго-востоке Азии (рис. 8а).

Устойчивы в июле (повторяемость 99,6 %) минимумы объектов Южно-Азиатской депрессии (рис. 8б). Особенности характеристик данного ЦДА отражены в работах [18, 19].

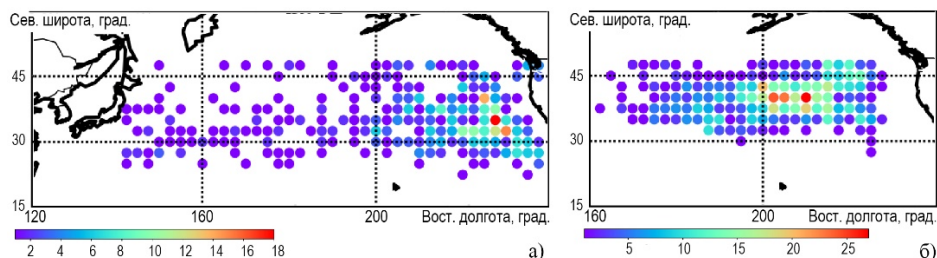


Рис. 5. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Северо-Тихоокеанского максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 5. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of North Pacific high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (б).

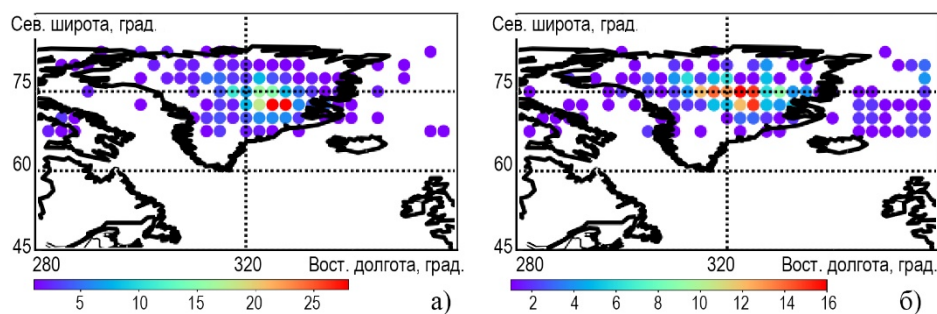


Рис. 6. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Гренландского максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 6. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Greenland high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (б).

Северо-Американский (Канадский) максимум в январе сменяется Северо-Американским минимумом в июле (рис. 9), если повторяемость антициклонов примерно 70 %, то циклонов ~30 %. Как следует из рис. 9б и 4б, в летнее время распределения центров циклонических объектов Северо-Американского минимума и Исландской депрессии (смещенные к западу) могут иметь общие области, поэтому статистические оценки характеристик ЦДА, как уже отмечалось, даны для рассматриваемых условных границ районов ЦДА (табл. 1).

Характеристики рассеяния центров Южно-Тихоокеанского (рис. 10), Южно-Атлантического (рис. 11), Южно-Индийского (рис. 12) антициклонов от января к июлю практически не изменяются, но их средние многолетние центры несколько смещаются в сезонах, соответственно, на северо-восток, северо-запад, северо-запад (табл. 1).

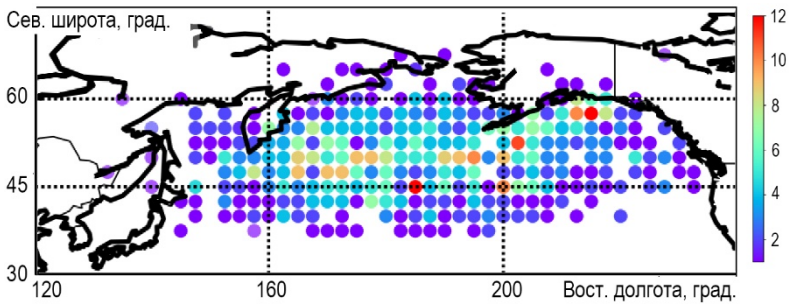


Рис. 7. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Алеутской депрессии в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг., январь).

Fig. 7. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Aleutian Low at regular grid nodes (1992–2021, January).

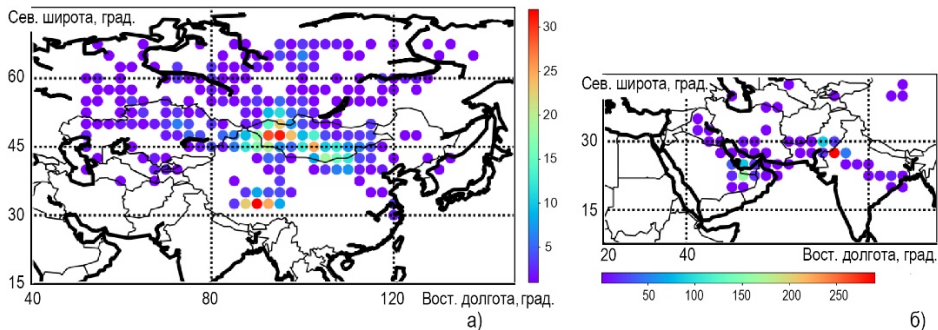


Рис. 8. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Сибирского максимума в январе (а) и Южно-Азиатской депрессии в июле (б) в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.).

Fig. 8. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Siberian high (a), and South Asia Low in July (б) at regular grid nodes (1992–2021).

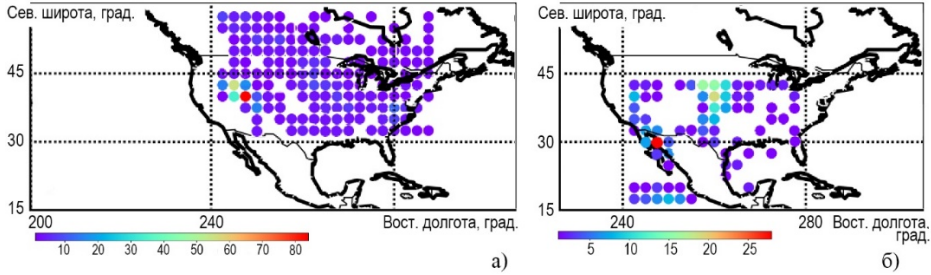


Рис. 9. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Северо-Американского (Канадского) максимума в январе (а) и Северо-Американского циклона в июле (б) в узлах регулярной сетки (1992–2021 г.).

Fig. 9. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of North American (Canadian) high in January (a), and North American Low in July (б) at regular grid nodes (1992–2021).

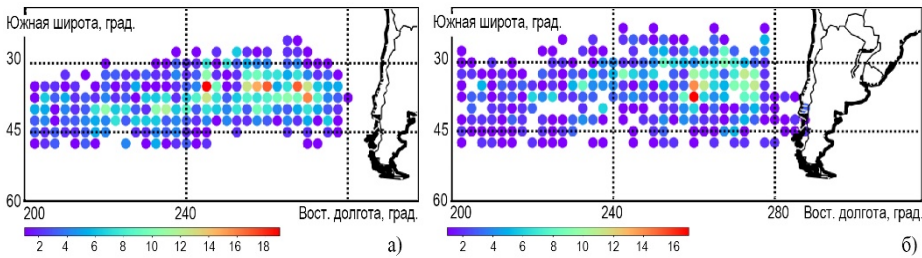


Рис. 10. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Южно-Тихоокеанского максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 г.): январь (а); июль (б).

Fig. 10. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of South Pacific high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (б).

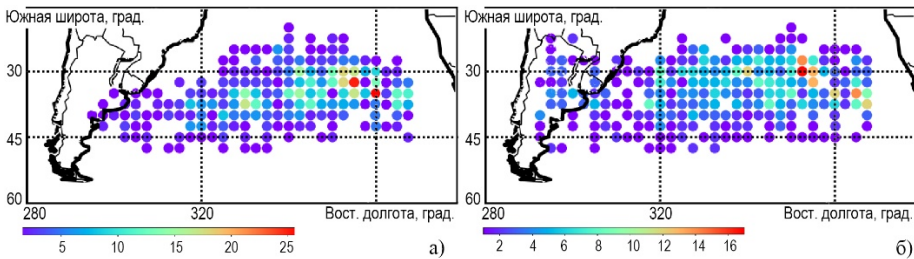


Рис. 11. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Южно-Атлантического максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 г.): январь (а); июль (б).

Fig. 11. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of South Atlantic high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (б).

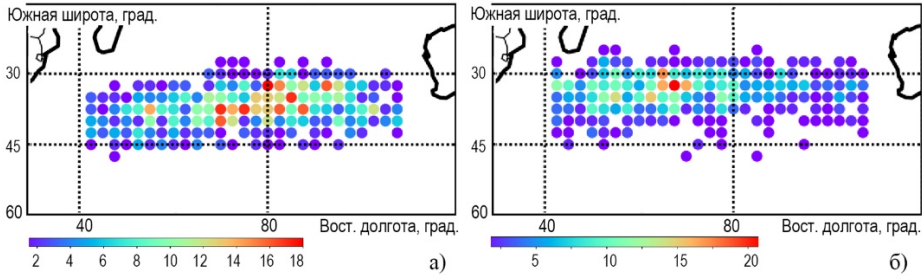


Рис. 12. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Южно-Индийского максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б)

Fig. 12. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of South India high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (б).

Сезонный Южно-Американский минимум (рис. 13а) отличается невысокой повторяемостью (~30 %). Циклонические объекты Южно-Африканского минимума в январе обладают наименьшей повторяемостью 21 % (табл. 1), распределяются от 15° северной широты до 45° южной (рис. 13б). В июле объекты Южно-Африканского максимума концентрируются в районе 31° южной широты (рис. 13в).

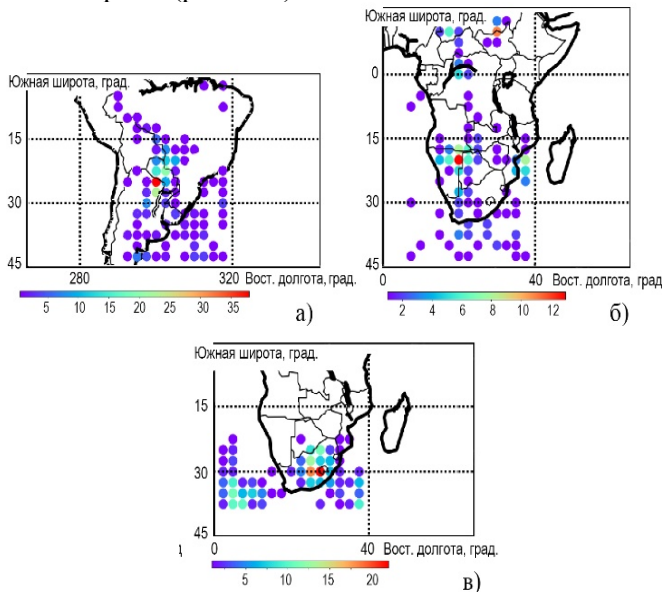


Рис. 13. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Южно-Американского минимума в январе (а), Южно-Африканского минимума в январе (б) и Южно-Африканского максимума в июле (в) в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.).

Fig. 13. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of South American Low in January (a), South Africa Low in January (б) and South Africa high in July (в) at regular grid nodes (1992–2021).

Центр Южно-Австралийского минимума в январе находится на широте (южной) $\sim 24^\circ$, в июле центр Южно-Австралийского антициклона – на широте $\sim 35^\circ$ (рис. 14, табл. 1).

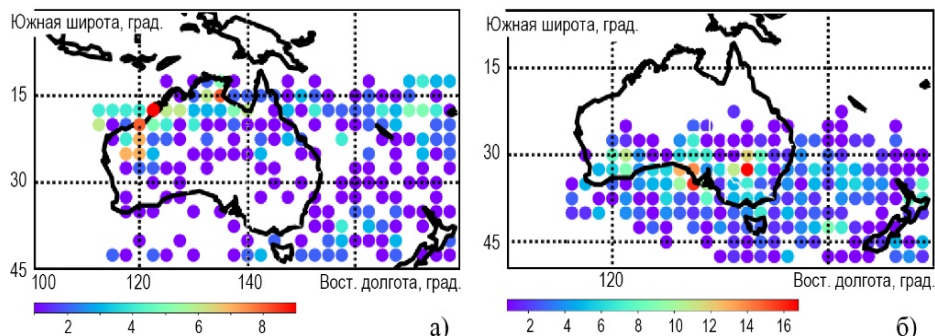


Рис. 14. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Австралийского минимума в январе (а) и Австралийского максимума в июле (б) в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.).

Fig. 14. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Australian Low in January (a) and Australian high in July (б) at regular grid nodes (1992–2021).

Сравнительный анализ характеристик ЦДА за разные периоды

Проведено сравнение расчетных статистических оценок характеристик ЦДА периода 1992–2021 гг. (NCEP/DOE) с соответствующими оценками базового климатического периода 1961–1990 гг. (по данным реанализа NCEP/NCAR, для которого также рассчитаны среднегодовые ряды данных). Сравнение с данными других источников, например для периода 1981–2010 гг. (по данным реанализа ERA-Interim и др.) [13] или для 1949–2000 гг. (по данным ВНИИГМИ-МЦД) [12], может быть не совсем корректным, поскольку в работах рассматриваются разные границы районов ЦДА и различные периоды осреднения.

Результаты сравнения представлены в табл. 2 в виде аномалий $\delta x_i = x_i - x_{i1}$, где x_i, x_{i1} – статистические оценки характеристик (средней геопотенциальной высоты \bar{H}_0 , широты и долготы $\bar{\varphi}, \bar{\lambda}$ центров, средних квадратических отклонений центров $\sigma_\varphi, \sigma_\lambda$ по широте и долготе), соответственно, для периодов 1992–2021 и 1961–1990 гг. Однако представленная форма изменения характеристик ЦДА является малоинформативной, поэтому дополнительно дана оценка статистической значимости их различий в рассматриваемых периодах.

Таблица 2. Аномалии характеристик ЦДА периода 1992–2021 гг. (NCEP/DOE) относительно базового климатического периода 1961–1990 гг. (NCEP/NCAR)
Table 2. Anomalies of characteristics of Atmospheric Centers of Action of period 1992–2021 (NCEP/DOE) relative to basic climatic period 1961–1990 (NCEP/NCAR)

ЦДА	Месяц	$\delta\bar{H}_0$, дам	$\delta\bar{\varphi}$, °	$\delta\bar{\lambda}$, °	$\delta\sigma_\varphi$, °	$\delta\sigma_\lambda$, °	δS , 1 млн км ²	δk
Северное полушарие								
<i>Перманентные</i>								
Азорский максимум	январь	0,50	0,1	2,7	0,0	0,2	0,3	0,02
	июль	-0,36	-1,7	-1,6	-1,2	-0,8	-0,6	-0,05
Исландский минимум	январь	-0,01	1,0	0,8	-0,3	-0,1	-0,2	-0,01
	июль	-0,08	-0,6	-0,9	-0,1	0,5	0,0	-0,01
Северо-Тихоокеанский максимум	январь	-0,22	-0,4	-1,4	0,1	1,6	0,5	-0,01
	июль	0,35	0,5	-0,9	-0,2	0,7	0,0	-0,03
Гренландский максимум	январь	-4,11	0,3	0,8	0,2	3,8	0,5	-0,07
	июль	1,14	-0,1	-1,2	-0,7	-6,4	-1,4	0,02
<i>Сезонные</i>								
Алеутский минимум	январь	-0,02	-0,2	2,3	-0,2	0,2	-0,1	-0,02
Сибирский максимум	январь	-0,01	-0,7	0,0	0,2	-0,8	-0,1	0,04
Канадский максимум	январь	-0,49	0,4	0,6	0,3	0,1	0,1	0,02
Северо-Американский минимум	июль	-0,89	0,5	3,0	0,8	0,5	0,3	0,03
Южно-Азиатский минимум	июль	0,96	-1,5	-1,3	-1,4	-0,1	-0,4	-0,10
Южное полушарие								
<i>Перманентные</i>								
Южно-Тихоокеанский максимум	январь	0,51	-0,6	-1,4	0,4	0,1	0,2	0,01
	июль	1,43	-0,4	1,2	-0,8	-0,7	-0,5	-0,02
Южно-Атлантический максимум	январь	0,91	-1,1	0,0	-0,4	0,5	-0,1	-0,03
	июль	1,09	-0,3	3,6	-0,3	-0,1	-0,2	-0,01
Южно-Индийский максимум	январь	1,22	-1,6	-1,6	-0,1	0,1	-0,1	-0,01
	июль	0,78	0,4	-0,3	-0,1	-0,3	-0,1	0,00
<i>Сезонные</i>								
Южно-Американский минимум	январь	0,38	2,4	1,3	1,9	0,1	0,3	-0,18
Южно-Африканский минимум	январь	1,59	-6,4	-0,9	-4,3	-0,7	-1,4	0,07
Южно-Африканский максимум	июль	1,53	0,0	0,0	0,3	0,5	0,1	0,00
Австралийский минимум	январь	-0,10	-1,2	3,2	1,1	-0,4	0,6	0,06
Австралийский максимум	июль	0,67	-0,3	1,5	-0,2	-0,3	-0,1	0,00

Проведена проверка статистических гипотез: во-первых, о принадлежности параметров разным распределениям; во-вторых, о значимом неравенстве средних. При этом применялись непараметрические критерии Смирнова – Колмогорова и Манна – Уитни для двух независимых выборок [17], в качестве которых использовались ряды среднегодовых средних для двух периодов (1992–2021, 1961–1990 гг.). В табл. 2 выделены ячейки при значимой (на уровне статистической значимости 0,05) неадекватности распределений параметров или при значимых отличиях средних (на уровне 0,05).

Для примера на рис. 15 приведены гистограммы распределения характеристик Гренландского максимума в различных периодах.

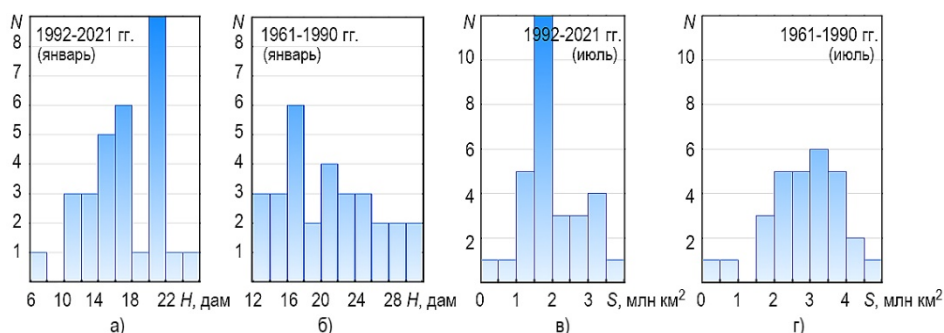


Рис. 15. Гистограммы распределения характеристик Гренландского максимума в разных периодах: средней геопотенциальной высоты в январе (а, б) и площади эллипса рассеяния в июле (в, г).

Fig. 15. Histograms of distribution of Greenland high characteristics in different periods: mean geopotential high in January (а, б), scattering ellipse area in July (в, г).

Как следует из данных табл. 2, в сравнении с базовым климатическим периодом значительно снизились средний максимум Гренландского ЦДА в январе и площадь его эллипса рассеяния в июле, что подтверждает происходящие в последние десятилетия процессы таяния ледяного щита Гренландии. Отмечается рост среднего минимума Южно-Азиатской депрессии и его смещение к югу, но углубление Северо-Американской депрессии, обусловленной прогреванием плоскогорий Большого бассейна и плато Колорадо.

В Южном полушарии определено значимое усиление интенсивности субтропических антициклонов. Вместе с этим изменились координаты широты (в южном направлении) их средних центров, что согласуется с выводами исследования [7] о связи широтного положения и интенсивности данных ЦДА (интенсивность увеличивается при перемещении ЦДА в более высокие широты, к югу, что обеспечивает адвекцию тепла и усиление

вихря в поле силы Кориолиса). Эти изменения характеристик ЦДА в сравнении с базовым климатическим периодом подтверждают аспекты современного климата в части интенсификации процессов Эль-Ниньо [13] и климатических изменений в прибрежных районах Антарктики [8].

Динамика характеристик ЦДА периода 2000–2021 годов

Оценка динамики характеристик ЦДА проведена в виде расчета хода скользящих десятилетних средних, результаты представлены для современного периода 2000–2021 гг. в табл. 3, при этом показаны только параметры, выделяющиеся особенностью тенденций, для которых коэффициент детерминации линейного тренда $R^2 > 0,7$. По данным табл. 3 можно сделать следующие выводы по тенденциям средних характеристик ЦДА.

Северное полушарие. Азорский максимум: в январе имеется тенденция перемещения среднего центра на запад, снижается рассеяние центров по широте, уменьшается степень сжатия эллипса рассеяния; в июле – тенденция смещения среднего центра в восточном направлении. Исландский минимум: в январе уменьшается рассеяние центров по широте, в июле есть тенденция смещения центра к западу. Северо-Тихоокеанский максимум: в январе снижается рассеяние центров по широте; в июле отмечается тенденция роста средней интенсивности и смещения центра в северном направлении. Гренландский антициклон: в январе присутствует тенденция роста среднего максимума, его смещения к востоку, при этом снижается площадь эллипса рассеивания и разброс центров по широте, долготе; в июле – только тенденция уменьшения среднего квадратического отклонения по долготе. Алеутский минимум в январе имеет тенденцию к углублению. Сибирский максимум: средний центр смещается к западу, увеличивается рассеивание в широтном направлении. Южно-Азиатская депрессия имеет тенденции роста рассеяния центров по долготе и площади эллипса рассеяния.

Южное полушарие. Южно-Тихоокеанский максимум: в январе имеет место тенденция смещения среднего центра на юго-запад. Южно-Атлантический максимум: в январе – тенденция смещения среднего центра в северном направлении; в июле – тенденции роста средней мощности, смещения центра к югу и снижения площади рассеивания. Южно-Индийский максимум: в январе – смещение среднего центра к западу, в июле – к юго-востоку, с ростом характеристик рассеяния. Южно-Американский минимум: центр смещается на юго-восток, растет площадь эллипса рассеивания. Южно-Африканский минимум и Южно-Африканский максимум: изменяются геометрические характеристики эллипса рассеяния. Австралийский минимум имеет тенденцию к снижению среднего давления.

Не выявлено значимых тенденций изменения характеристик сезонных ЦДА – Северо-Американского минимума и Канадского максимума (в табл. 3 не представлены).

Таблица 3. Тенденции характеристик ЦДА в скользящих периодах за 2000–2021 гг.**Table 3.** Characteristics trends of Atmospheric Centers of Action in moving periods for 2000–2021

ЦДА	Месяц	Параметр	Тренд*	R^2
Северное полушарие				
Азорский максимум	январь	$\bar{\lambda}$	–	0,72
		σ_{φ}	–	0,91
		k	–	0,85
	июль	$\bar{\lambda}$	+	0,90
Исландский минимум	январь	σ_{φ}	–	0,85
		k	–	0,76
	июль	$\bar{\lambda}$	–	0,93
Северо-Тихоокеанский максимум	январь	σ_{φ}	–	0,75
		k	–	0,80
	июль	\bar{H}_0	+	0,92
		$\bar{\varphi}$	+	0,82
Гренландский максимум	январь	\bar{H}_0	+	0,74
		$\bar{\lambda}$	+	0,72
		σ_{λ}	–	0,92
		σ_{φ}	–	0,90
		k	+	0,88
	S	–	0,91	
июль	σ_{λ}	–	0,83	
Алеутский минимум	январь	\bar{H}_0	–	0,70
Сибирский максимум	январь	$\bar{\lambda}$	–	0,88
		σ_{φ}	+	0,89
Южно-Азиатский минимум	июль	σ_{λ}	+	0,92
		S	+	0,70
Южное полушарие				
Южно-Тихоокеанский максимум	январь	$\bar{\lambda}$	–	0,78
		$\bar{\varphi}$	–	0,95
	июль	σ_{φ}	–	0,77
Южно-Атлантический максимум	январь	$\bar{\varphi}$	+	0,91
		июль	\bar{H}_0	+
	$\bar{\varphi}$		–	0,86
		S	–	0,73

ЦДА	Месяц	Параметр	Тренд*	R^2
Южно-Индийский максимум	январь	$\bar{\lambda}$	–	0,81
		σ_{φ}	+	0,77
		k	+	0,73
		S	+	0,73
	июль	$\bar{\lambda}$	+	0,96
		$\bar{\varphi}$	–	0,73
		σ_{φ}	+	0,77
		k	+	0,85
Южно-Американский минимум	январь	$\bar{\lambda}$	+	0,76
		$\bar{\varphi}$	–	0,71
		σ_{λ}	+	0,86
		σ_{φ}	+	0,81
		S	+	0,84
Южно-Африканский минимум	январь	σ_{φ}	–	0,89
		k	+	0,92
Южно-Африканский максимум	июль	σ_{λ}	+	0,74
Австралийский минимум	январь	\bar{H}_o	–	0,78
		σ_{φ}	+	0,77
Австралийский максимум	июль	σ_{φ}	–	0,72

Примечание. * (+) – рост; (–) – снижение.

Заключение

В настоящее время остаются востребованными статистические методы исследования [14]. Они позволяют на базе обработки большого объема материала проникнуть в суть атмосферных процессов путем выявления закономерностей их проявления, а увеличение количества и качества исходной информации о состоянии атмосферы дает возможность получить новые сведения об особенностях циркуляции для совершенствования методов долгосрочного прогнозирования, корректировки климатических моделей, оценки взаимосвязей параметров атмосферных процессов.

В данной работе представлены статистические оценки характеристик ЦДА Северного и Южного полушарий, отображены на карте распределения повторяемости синоптических центров действия в узлах регулярной сетки.

Полученные оценки параметров ЦДА на современном исходном материале позволили их сравнить с оценками базового климатического периода

1961–1990 гг. Основные статистически значимые изменения характеристик ЦДА следующие: для Северного полушария: в июле смещен к югу средний центр Азорского максимума; ослаблена интенсивность Гренландского максимума в январе, в июле уменьшилась площадь его эллипса рассеяния; в январе увеличилась площадь эллипса рассеяния Северо-Тихоокеанского антициклона; в июле углубился Северо-Американский минимум, но возрос средний минимум (со смещением к югу) Южно-Азиатской депрессии; для Южного полушария: произошло усиление субтропических антициклонов с отклонением к югу их центров.

Определены средние значения характеристик ЦДА в скользящих 10-летних периодах, которые позволили выявить значимые тенденции изменений периода 2000–2021 гг. Динамика характеристик ЦДА показывает, что в последние 20 лет происходит в январе: усиление Гренландского антициклона, углубление Алеутского и Австралийского циклонов; в июле: рост среднего максимума Северо-Тихоокеанского и Южно-Атлантического антициклонов. Кроме того, отмечаются тенденции изменений положения средних центров многих ЦДА и их геометрических характеристик рассеяния. Отмеченные изменения связаны со сложными взаимозависимыми климатическими механизмами, типами потепления [11], ведущими климатическими модами [13].

Список литературы

1. Алимтеева М.А., Морозова С.В. О состоянии центров действия атмосферы на фоне глобальных климатических тенденций // Современная экология: образование, наука, практика. Воронеж: Научная книга, 2017. С. 383-387.
2. Анасова Е.Г. О характеристиках местоположения центров действия атмосферы // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1979. Вып. 58. С. 89-97.
3. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Долгопериодные изменения повторяемости циклонов в умеренных широтах Северного полушария // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7, № 2. С. 57-80. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-2-57-80.
4. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. № 3. С. 32-58. DOI: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58.
5. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Особенности изменчивости циклонической активности умеренных широт северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в атлантико-европейском секторе // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 2. С. 14-40.
6. Вершовский М.Г. Статистические оценки многолетних изменений интенсивности центров действия атмосферы // Электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2007. № 26. С. 1-15.
7. Вершовский М.Г., Кондратович К.В. Южно-Тихоокеанский субтропический антициклон: интенсивность и локализация // Метеорология и гидрология. 2007. № 12. С. 29-34.
8. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. Крупномасштабные колебания циркуляции атмосферы в Южном полушарии и их влияние на изменение климата некоторых регионов земного шара в XX веке // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 5-17.
9. Егорина А.В. Режим атмосферной циркуляции над Евразией // Международный журнал прикладных исследований. 2015. № 6 (часть 2). С. 265-268. [Электронный ресурс]. URL: <https://applied-research.ru/article/view?id=6885> (дата обращения: 28.07.2022).

10. Морозова С.В. Комплексный анализ основных центров действия атмосферы Северного полушария // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2013. Т. 13. Вып. 1. С. 38-44.

11. Мохов И.И., Петухов В.К. Центры действия в атмосфере и тенденции их изменения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36, № 3. С. 321-329.

12. Мохов И.И., Хон В.Ч. Межгодовая изменчивость и долгопериодные тенденции изменений центров действия атмосферы в Северном полушарии: Анализ данных наблюдений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 6. С. 723-732.

13. Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М. Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: особенности и изменчивость // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 5-23.

14. Ранькова Э.Я., Алексеев Г.В., Алешина М.А. и др. Статистическая климатология: современные достижения и новые идеи (Научные чтения памяти Георгия Вадимовича Груза) // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8, № 1. С. 5-50. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-5-50.

15. Розанова И.В., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. Изменчивость интенсивности и положения циклонического центра действия в атлантическом секторе Южного океана во второй половине XX столетия // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 75-82.

16. Смолянкина Т.В. Центры действия атмосферы Северного полушария и их вклад в формирование аномалий погоды Дальнего Востока: автореферат дис. канд. геогр. наук: 11.00.09. Владивосток, 2000. 25 с.

17. Справочник по прикладной статистике. Т. 2 / Пер. с англ., под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, С.А. Айвазяна, Ю.Н. Тюрина. М.: Финансы и статистика, 1990. 526 с.

18. Шипко Ю.В., Балакин В.С., Шувакин Е.В. Факторная модель переднеазиатской депрессии на изобарическом уровне 925 гПа // Вестник Воронежского гос. университета. Серия: География. Геоэкология. 2020. № 1. С. 22-28. DOI: 10.17308/geo.2020.1/2657.

19. Шипко Ю.В., Кольчев О.В., Дьяков С.А., Кузнецов И.Е., Закусилов В.П. Методика анализа обобщенных характеристик структуры Южноазиатской депрессии с учетом термического режима подстилающей поверхности // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 84-98. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-4-84-98.

20. Atmospheric Centers of Action Indices [Электронный ресурс]. URL: <https://you.stonybrook.edu/coaindices> (дата обращения: 28.07.2022).

21. Atmospheric Reanalyses Comparison Table [Электронный ресурс]. URL: <https://reanalyses.org/atmosphere/comparison-table> (дата обращения: 20.02.2023).

22. Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Osipov A.M. Atmospheric centers of action in the Northern and Southern Hemispheres: Tendencies of change in the 21st century from model simulations // Research Activities in Earth System Modelling. 2021. Rep. 51. WCRP report № 4/2021. WMO. Geneva. S. 7. P. 11-12.

23. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis [Электронный ресурс]. URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html> (дата обращения: 20.09.2021).

24. NCEP-NCAR Reanalysis [Электронный ресурс]. URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 20.02.2023).

25. Tilinina N., Gulev S.K., Rudeva I., Koltermann P. Comparing cyclone life cycle characteristics and their interannual variability in different reanalyses // Journal of Climate. 2013. Т. 26, № 17. С. 6419-6438. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00777.1

References

1. Alimpieva M.A., Morozova S.V. On the state of atmospheric centers of action against the background of global climate change. *Sovremennaya ekologiya: obrazovanie, nauka, praktika. [Modern ecology: Education, Science, Practice]*. Voronezh: Science book publ., 2017, pp. 383-387 [in Russ.].

2. Apasova E.G. About the characteristics of the location of atmospheric action centers. *Trudy VNIIGMI-MCD [Proceedings of RIHMI-WDC]*, 1979, vol. 58, pp. 89-97 [in Russ.].
3. Bardin M.Yu., Platova T.V., Samokhina O.F. Long-period variation of cyclone frequency in the Northern Extratropics. *Fundamental and Applied Climatology*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 57-80, DOI: 10.21513/2410-8758-2021-2-57-80 [in Russ.].
4. Bardin M.Yu., Platova T.V., Samokhina O.F. Variability of anti-cyclonic activity in Northern Extratropics. *Fundamental and Applied Climatology*, 2019, no. 3, pp. 32-58, DOI: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58 [in Russ.].
5. Bardin M.Yu., Platova T.V., Samokhina O.F. Specific features of variability of cyclone activity in Northern Extratropics associated with leading atmospheric circulation modes in Atlantic-European sector. *Fundamental and Applied Climatology*, 2015, no. 2, pp. 14-40 [in Russ.].
6. Vershovskii M.G. Statistical estimates of long-term intensity changes of atmospheric centers of action. *Electronic journal of Kuban state university*, 2007, no. 26, pp. 1-15 [in Russ.].
7. Vershovskii M.G., Kondratovich K.V. South Pacific subtropical anticyclone: Intensity and localization. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2007, vol. 32, no. 12, pp. 738-742. DOI: 10.3103/S1068373907120035.
8. Gruza G.V., Ran'kova E.Y., Rocheva E.V. Large-scale oscillations of the atmospheric circulation in the southern hemisphere and their influence on climate change in some regions of the globe in the 20th century. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2007, vol. 32, no. 7, pp. 417-425. DOI: 10.3103/S1068373907070011.
9. Egorina A.V. Circulation atmosphere over Eurasia. *International Journal of Applied Research*, 2015, no. 6, part. 2, pp. 265-268. Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6885> [in Russ.].
10. Morozova S.V. Comprehensive analysis of atmospheric centers of action of the Northern hemisphere. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Nauki o Zemle [Izv. of Saratov university. New series. Earth Science series]*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 38-44 [in Russ.].
11. Mokhov I.I., Petukhov V.K. Atmospheric centers of action and tendencies of their change. *Izv. Atmospheric and ocean physics*, 2000, vol. 36, no. 3, pp. 321-329 [in Russ.].
12. Mokhov I.I., Khon V.Ch. Interannual variability and long-term tendencies of change in atmospheric centers of action in the Northern hemisphere: Analyses of observational data. *Izv. Atmospheric and ocean physics*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 723-732 [in Russ.].
13. Mokhov I.I., Chernokul'skii A.V., Osipov A.M. Atmospheric Centers of Action in the Northern and Southern Hemispheres: Features and Variability. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 11, pp. 749-761. DOI: 10.3103/S1068373920110011
14. Rankova E.Ya., Alekseev G.V., Aleshina M.A. et al. Statistical climatology: modern achievements and new ideas (Scientific readings in memory of G.V. Gruza). *Fundamental and Applied Climatology*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 5-50. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-5-50 [in Russ.].
15. Rozanova I.V., Sarukhanyan E.I., Smirnov N.P. Variability of intensity and position of the cyclone center of action in Atlantic sector of the Southern ocean in the second half of the 20th century. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2003, no. 1, pp. 75-82 [in Russ.].
16. Smolyukina T.V. Atmospheric Centers of Action of the Northern Hemisphere and their contribution to the formation of weather anomalies in the Far East. *Abstract of the dissertation cand. geogr. sciences*, Vladivostok, 2000, 25 p. [in Russ.].
17. *Spravochnik po prikladnoy statistike*. Vol. 2. Per. s angl., pod red. E. Lloyda, U. Ledermana, S.A. Ayvazyana, YU.N. Tyurina. M.: Finansy i statistika, 1990, 526 p. [in Russ.].
18. Shipko Yu.V., Balakin V.S., Shuvakin E.V. Factor model of the South Asia Low at the isobaric level 925 hPa. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, 2020, no. 1, pp. 22-28. DOI: 10.17308/geo.2020.1/2657 [in Russ.].
19. Shipko Yu.V., Kolychev O.V., Dykov S.A., Kyznetsov I.E., Zakusilov V.P. Method of analysis of generalized characteristics of the South Asia Low structure taking into account thermal regime of underlying surface. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]* 2021, vol. 382, no. 4, pp. 84-98. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-4-84-98 [in Russ.].

20. Atmospheric Centers of Action Indices. Available at: <https://you.stonybrook.edu/coaindices> (accessed: 28.07.2022).

21. Atmospheric Reanalyses Comparison Table. Available at: <https://reanalyses.org/atmosphere/comparison-table> (accessed: 20.02.2023).

22. Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Osipov A.M. Atmospheric centers of action in the Northern and Southern Hemispheres: Tendencies of change in the 21st century from model simulations. *Research Activities in Earth System Modelling*, 2021, Rep. 51, WCRP report no. 4/2021, WMO, Geneva, S. 7, pp. 11–12.

23. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis. Available at: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html> (accessed: 20.09.2021).

24. NCEP-NCAR Reanalysis Available at: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (accessed: 20.02.2023).

25. Tilinina N., Gulev S.K., Rudeva I., Koltermann P. Comparing cyclone life cycle characteristics and their interannual variability in different reanalyses. *J. Clim.*, 2013, vol. 26, no. 17, pp. 6419–6438. Doi: 10.1175/JCLI-D-12-00777.1.

*Поступила 27.12.2022; одобрена после рецензирования 30.05.2023;
принята в печать 13.06.2023.*

*Submitted 27.12.2022; approved after reviewing 30.05.2023;
accepted for publication 13.06.2023.*