

РАЗДЕЛ 5. ГИДРОЛОГИЯ, ОКЕАНОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

УДК 515.509.33

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРА ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ НА УРОВНЕ 100 ГПА

Шипко Ю.В.¹, Шувакин Е.В.¹, Гедзенко Д.В.¹, Неижмак А.Н.²

¹*Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Российская Федерация*

²*Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков, Краснодар, Российская Федерация*

E-mail: kubanec@inbox.ru, gdv555@pochta.ru

В статье представлена модель циркумполярного вихря на изобарическом уровне 100 гПа, даны подходы автоматизированного расчета основных характеристик полюса циркуляции: координат центра, лапласиана, ориентации оси ложбины. Приведены их статистические оценки для января и июля. Рассчитаны поля информативности данных характеристик для приземной температуры воздуха.

Ключевые слова: циркумполярный вихрь, центр циркуляции, лапласиан, ось ложбины, температура воздуха.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из обобщенных объектов, описывающих особенности атмосферной циркуляции в северном полушарии, можно считать циркумполярный вихрь (ЦПВ) с центром в районе полюса и западно-восточным движением воздуха. Характеристики ЦПВ (положение центра циркуляции, мощность, конфигурация и др.) оказывают существенное влияние на формирование погодных условий различных районов России. Изучение данного объекта позволяет углубить понимание закономерностей общей циркуляции атмосферы и соответственно улучшить качество метеорологических прогнозов.

Важное место в исследованиях ЦПВ занимают вопросы, касающиеся определения центра циркуляции и местоположения вихря [1, 2]. Имеются различные подходы к расчету центра вихря и моделированию ЦПВ [3–6]. Анализ работ по определению центра (или полюса) циркуляции атмосферы показывает, что в этом вопросе нет однозначного толкования [2].

Большинство методов прогноза основаны на использовании информации о циркуляции только в нижней или средней тропосфере, однако, исследования показывают, что значительную роль в формировании погоды играют также процессы, происходящие в более высоких слоях атмосферы, в частности, в стратосфере [7]. ЦПВ просматривается над всем полушарием, как в тропосфере, так и в стратосфере, поэтому информация о его состоянии на высоких изобарических уровнях позволит более успешно решать задачи моделирования и прогноза метеорологических параметров.

Цель данной работы – совершенствование модели ЦПВ северного полушария путем оценки характеристик центра циркуляции атмосферы на уровне 100 гПа и их информативности для приземной температуры воздуха.

Поставленная цель достигается решением задачи программного определения характеристик центра ЦПВ с использованием алгоритмов анализа полей геопотенциальной высоты изобарического уровня 100 гПа.

В качестве исходного материала использовались сеточные данные (в узлах регулярной сетки с шагом $2,5^\circ$ по широте и долготе) реанализа параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II [8] за период 1980–2015 гг. (4-х срочные значения полей геопотенциальной высоты на изобарическом уровне 100 гПа и температуры воздуха на уровне 1000 гПа, по которым выполнен расчет среднесуточных значений).

1. ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ЦИРКУЛЯЦИИ НА УРОВНЕ 500 ГПа

При построении моделей ЦПВ чаще используется изобарический уровень 500 гПа [1–3, 6, 9]. Адекватным представляется подход, определяющий центр циркуляции как положение центра масс атмосферы, заключенной между поверхностью H_{500} и горизонтальной плоскостью, проходящей через краевую изогипсу H_0 [1–3]:

$$x_c = \frac{r \sum \sum (H_0 - H_{ij}) \cos^2 \varphi_i \cos \lambda_j}{\sum \sum (H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i}, \quad (1)$$

$$y_c = \frac{r \sum \sum (H_0 - H_{ij}) \cos^2 \varphi_i \sin \lambda_j}{\sum \sum (H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i}, \quad (2)$$

где рассматривается декартова система координат XOY в плоскости экватора, центр совмещен с центром Земли, ось X направлена к нулевому меридиану, ось Y – на восток (90° западной – 90° восточной долготы); r – радиус Земли; H_{ij} – значение высоты изобарической поверхности в точке (x_i, y_j) , учитываются точки (узлы), для которых выполняется условие $H_{ij} < H_0$; φ_i, λ_j – широта и долгота точки соответственно, $i = \overline{1, l}, j = \overline{1, m}$ (l, m – размерности расчетной сетки полушария по северной широте и восточной долготе с шагом $2,5^\circ$).

Ограничивающая изогипса H_0 выбирается совпадающей с осью планетарной высотной фронтальной зоны (увеличенных горизонтальных градиентов температуры и давления в средней и верхней тропосфере, имеющей большое протяжение в умеренных или субтропических широтах), при этом принимается постоянное значение для определенного месяца [1–3]. Данная модель (обозначим как модель 1) имеет некоторую неопределенность и неоднозначность выбора изогипсы H_0 и вопрос о положении центра ЦПВ однозначно не решается.

Модель ЦПВ с оперативным (автоматизированным) определением краевой изогипсы [6, 10] (обозначим как модель 2) также не решает задачи приближения модельного центра ЦПВ к фактическому, поскольку околополюсная циркуляция в

тропосфере распадается на несколько центров. И первая замкнутая изогипса, охватывающая все частные центры, при этом может дать очень большое смещение центра циркуляции.

Проведена сравнительная оценка рассмотренных моделей ЦПВ 1 и 2 по параметру смещения модельного центра циркуляции относительно фактического центра. В качестве фактического центра атмосферной циркуляции условно принят локальный (в интервале 60–90° северной широты) минимум геопотенциальной поверхности H_{500} северного полушария.

Средняя ошибка отклонений центра циркуляции по долготе для модели 1 составила 13,7°, для модели 2 – 41,5°. Средняя ошибка по широте – соответственно –11,8 и –14,6°. При этом тест по t -критерию Стьюдента [11] показал значимое отличие (на уровне значимости $\alpha = 0,05$) модельных отклонений центра циркуляции для сравниваемых моделей.

Поскольку рассмотренные модели 1, 2 дают в среднем сравнительно большие отклонения модельных центров циркуляции от фактических, предлагается при построении модели ЦПВ (с определением характеристик центра) использовать поверхность геопотенциальной высоты уровня 100 гПа, где прослеживается (в основном) только один минимум.

2. МОДЕЛЬ ЦИРКУМПОЛЯРНОГО ВИХРЯ УРОВНЯ 100 ГПА

Рассматривается поверхность H_{100} геопотенциальной высоты уровня 100 гПа, которая (согласно исходным данным [8]) представлена дискретными значениями в узлах регулярной сетки с шагом 2,5°. Данное образование ограничивается определенной широтой, условно выбирается $\varphi_0 = 40^\circ$, поскольку в представленной архивной выборке не было случаев выхода минимума H_{100} за пределы данной широты. Алгоритм построения модифицированной модели ЦПВ включает следующие последовательные процедуры.

1) Расчет минимального значения H_{100} на заданной широте φ_0 . Данное значение принимается за краевую изогипсу $H_0 = \min H|_{\varphi=40}$.

2) В области значений геопотенциальной высоты $H_{100} \leq H_0$ по широте и долготе определяется абсолютный минимум H_c и его координаты (x_c, y_c) . Данное значение принимается за центр циркуляции.

3) Для более полного описания поля давления в качестве дополнительного параметра модели на уровне 100 гПа включается лапласиан (как характеристика вертикальной составляющей вихря скорости) [12]:

$$\nabla^2 H_{100} = (H_1 + H_2 + H_3 + H_4 - 4H_0)/(ds)^2, \quad (3)$$

где H_0, H_1, H_2, H_3, H_4 – значения H_{100} в точках расчетной сетки, при этом точка 0 соответствует центру (x_c, y_c) ; ds – шаг регулярной сетки.

4) Определение оси ложбины циркумполярного образования. Полагается, что «чаша» поверхности геопотенциальной высоты H_{100} заполняется жидкостью до

граничного уровня H_{cp} , равного значению H_{100} в точке геометрического полюса $H|_{\varphi=90}$. Определяются точки (узлы регулярной сетки) и их координаты (x_c, y_c) , находящиеся под «зеркалом» жидкости, для которых выполняется условие $H_i \leq H_{cp}$. Пример отображения поверхности точек $H_i \leq H_{cp}$ средней суточной геопотенциальной высоты H_{100} (для 1 января 2013 г.) представлен на рис. 1, где явно просматривается минимум поверхности – центр вихря, а также ложбина циркумполярного образования.

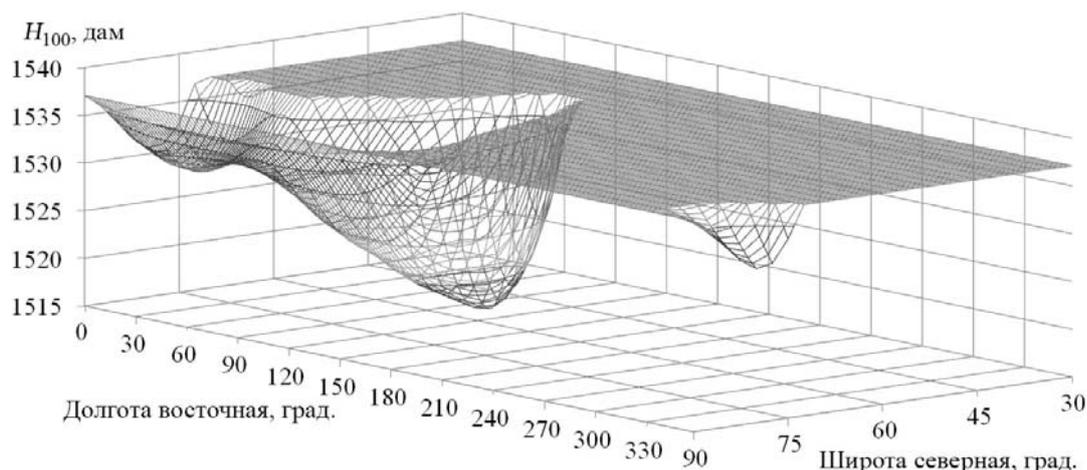


Рис. 1. Поверхность средней суточной геопотенциальной высоты уровня 100 гПа, ограниченная краевой изогипсой H_{cp} (1 января 2013 г.).

В случае, когда абсолютный минимум поверхности H_{100} совпадает с координатами полюса, т. е. $H_c = H|_{\varphi=90}$, значение H_{cp} задается следующим образом:

$H_{\bar{a}d} = H|_{\varphi=90} + 10\bar{a}\bar{d}\bar{i}$ («чаша» поверхности H_{100} условно заполняется жидкостью до этого уровня). Пример такого случая для 8 января 1981 г. поверхности H_{100} представлен на рис. 2а (в отличие от наиболее часто наблюдаемой конфигурации, данной на рис. 2б, когда центр циркуляции – минимум поверхности H_{100} – смещен относительно геометрического полюса).

Положение оси ложбины циркумполярного образования относительно оси Ox выбранной системы координат определяется углом β . Разработана методика расчета угла β [13] для представленного на рисунке 1 «чаши» усеченного циркумполярного образования.

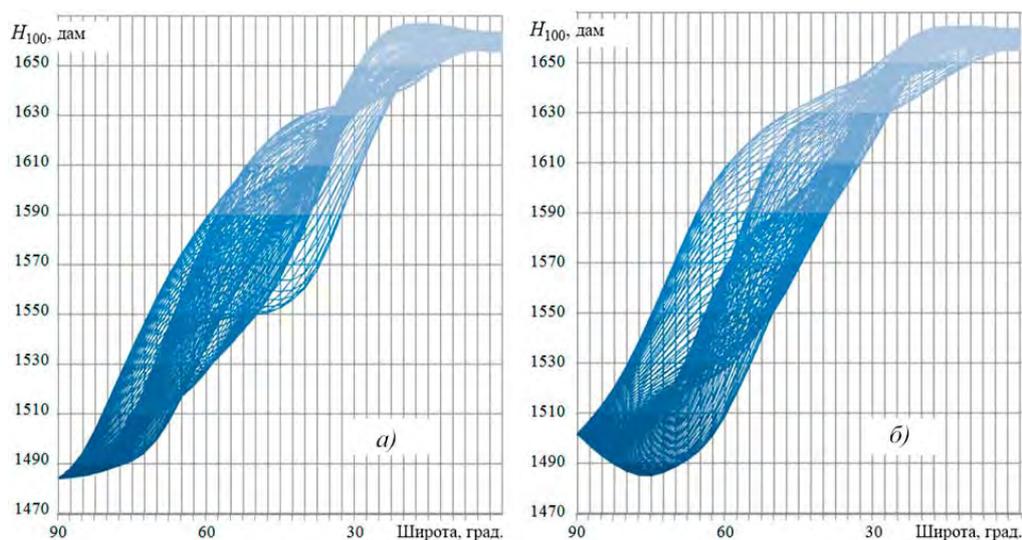


Рис. 2. Отображение проекции на меридиональную плоскость развертки по долготе поверхности средней суточной геопотенциальной высоты уровня 100 гПа: а) 8 января 1981 г.; б) 3 января 1981 г.

5) Расчет других характеристик модели ЦПВ на уровне 100 гПа с учетом принятой краевой изогипсой H_0 : условных площади и массы, интенсивности, параметров эллипса рассеяния масс: угла ориентации, средних квадратических отклонений по главным осям, коэффициента сжатия [3].

В данной работе результаты ограничены только представлением характеристик полюса циркуляции, отмеченных в п. 1–4. Положение центра циркуляции, лапласиан, ориентация оси барической ложбины являются одними из основных характеристик общей циркуляции атмосферы и могут служить индикатором развития синоптических процессов в нижней и средней тропосфере в рамках прогнозирования метеорологических условий на различные сроки.

По среднесуточным значениям параметров модели ЦПВ получены их статистические оценки (климатические характеристики) для центральных месяцев зимы и лета (января, июля) периода 1980–2015 гг., которые представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Статистические оценки параметров модели в январе

Параметр	Средняя	Медиана	Минимум	Максимум	Станд. отклонение
x_c , км	214	250	-2200	2872	856
y_c , км	177	345	-3746	3394	1663
$\nabla^2 H$, дам/км ²	0,00339	0,00278	0,00007	0,01103	0,00257
β , град.	95,4	95,6	30,2	157,7	13,5

Таблица 2

Статистические оценки параметров модели в июле

Параметр	Средняя	Медиана	Минимум	Максимум	Станд. отклонение
x_c , км	205	342	-4080	3864	1577
y_c , км	-1027	-1074	-3820	2939	1282
$\nabla^2 H$, дам/км ²	0,00160	0,00158	0,00003	0,00413	0,00089
β , град.	96,9	97,8	16,6	161,5	20,5

Распределения центров циркуляции (x_c , y_c) на уровне 100 гПа периода 1980–2015 гг., определенных как минимумы поверхностей H_{100} , представлены для января и июля в полярной системе координат на рис. 3.

Как видно из рис. 3, совпадение центра циркуляции (на уровне 100 гПа) с точкой географического полюса встречается крайне редко. Кроме того, как следует из данных таблиц 1, 2 и рис. 3, среднее значение положений центра циркуляции в январе соответствует восточному полушарию, в июле – западному.

3. ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРА ЦИРКУЛЯЦИИ

Модель уровня 100 гПа использовалась для оценки информативности характеристик циркуляции свободной атмосферы с целью возможности их использования в прогностических схемах поля приземной температуры воздуха.

В качестве показателя информативности использовался линейный коэффициент корреляции [11] между характеристиками центра ЦПВ f_k ($f_1 = x_c$, $f_2 = y_c$, $f_3 = \nabla^2 H$) и температурой воздуха t_{ij} в узлах (φ_i , λ_j) регулярной сетки на уровне 1000 гПа:

$$r_{ft} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \left(\frac{f_{km} - \bar{f}_k}{\sigma_{fk}} \right) \left(\frac{t_{ijm} - \bar{t}_{ij}}{\sigma_{ij}} \right), \quad (4)$$

где \bar{f}_k , \bar{t}_{ij} – средние значения параметров; σ_{fk} , σ_{ij} – средние квадратические отклонения параметров.

Чтобы оценить существенность (значимость) оценки коэффициента корреляции r и, соответственно, реальность измеряемой связи между температурой воздуха и параметрами ЦПВ, проверяется гипотеза о равенстве коэффициента корреляции нулю. Для принятия гипотезы $H_0: r = 0$, используется условие [11]:

$$t = \frac{|r^*| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^{*2}}} < t_{кр}(\alpha, \nu), \quad (5)$$

где $t_{кр}(\alpha, \nu)$ – критическая точка распределения Стьюдента с $\nu = n-2$ степенями свободы уровня значимости α .

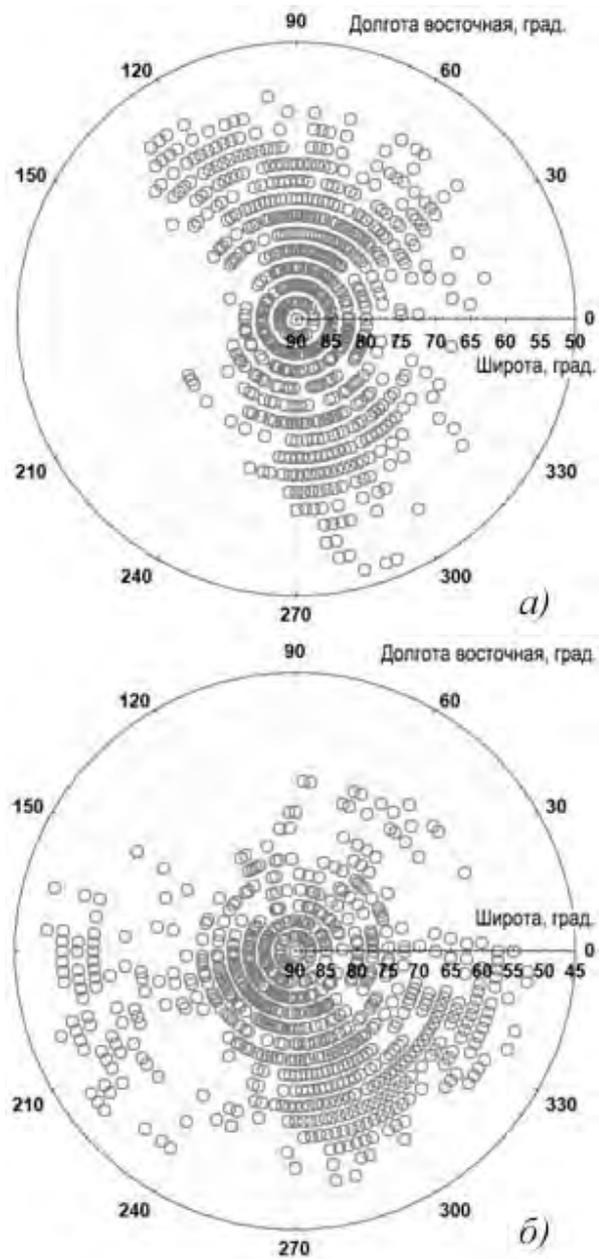


Рис. 3. Распределение центров ЦПВ уровня 100 гПа в полярной системе координат (1980–2015 гг.): а) январь; б) июль.

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРА ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ
НА УРОВНЕ 100 ГПА

Определено, что нулевая гипотеза H_0 отвергается при $|r^*| > 0,07$ (при уровне значимости $\alpha = 0,025$ и объемах выборки $800 < n < 1100$ (объем выборки уменьшается при расчетах со сдвигом во времени)). Таким образом, условно можно считать информативными характеристики центра ЦПВ, для которых выборочный коэффициент корреляции с температурой воздуха $|r^*| > 0,07$.

Выполнен расчет корреляционной зависимости приземной температуры воздуха (уровня 1000 гПа) и характеристик центра ЦПВ (уровня 100 гПа) для синхронной связи и со сдвигом по времени 4 и 7 суток. Поля распределения коэффициента корреляции отражены на картах северного полушария и представлены на рис. 4–12 в виде $|r^*| > 0,1$ (для примера расчеты выполнены для января, когда ЦПВ наиболее выражен).

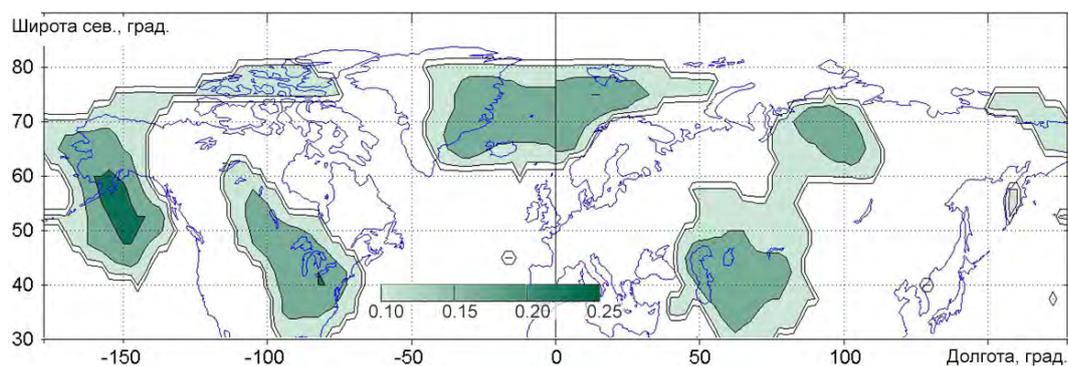


Рис. 4. Поле информативности параметра f_1 на карте северного полушария (синхронное, январь 1980–2015 гг.).

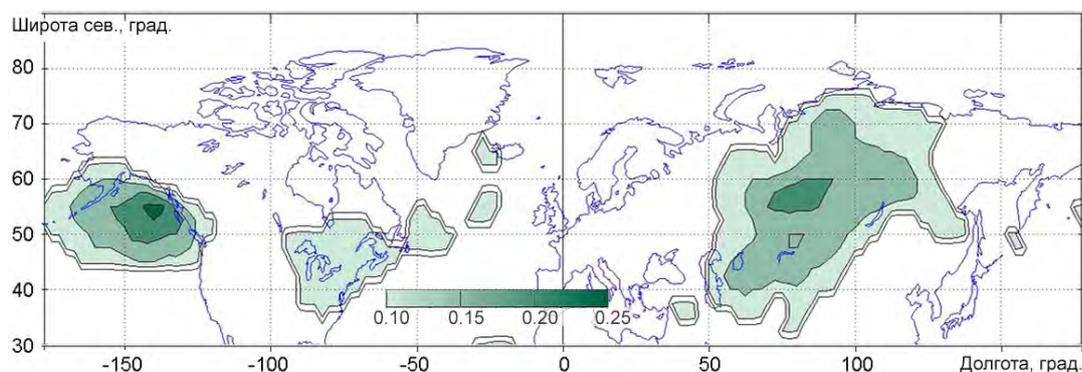


Рис. 5. Поле информативности параметра f_1 на карте северного полушария (сдвиг 4 суток, январь 1980–2015 гг.).

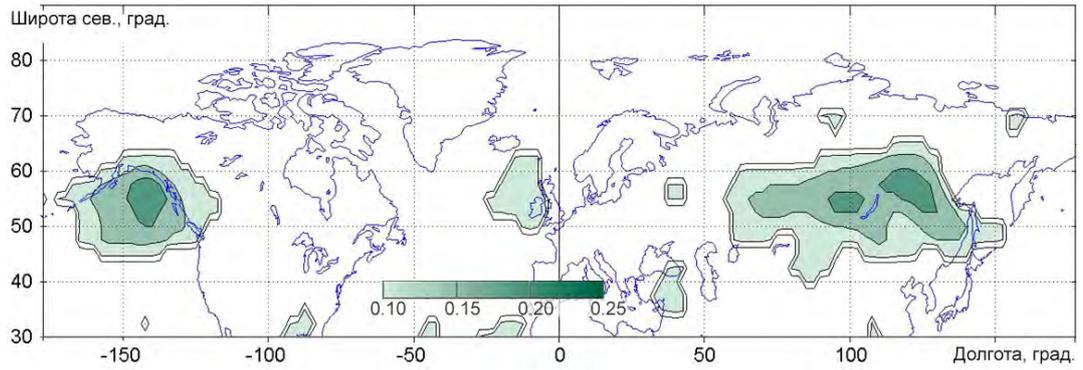


Рис. 6. Поле информативности параметра f_1 на карте северного полушария (сдвиг 7 суток, январь 1980–2015 гг.).

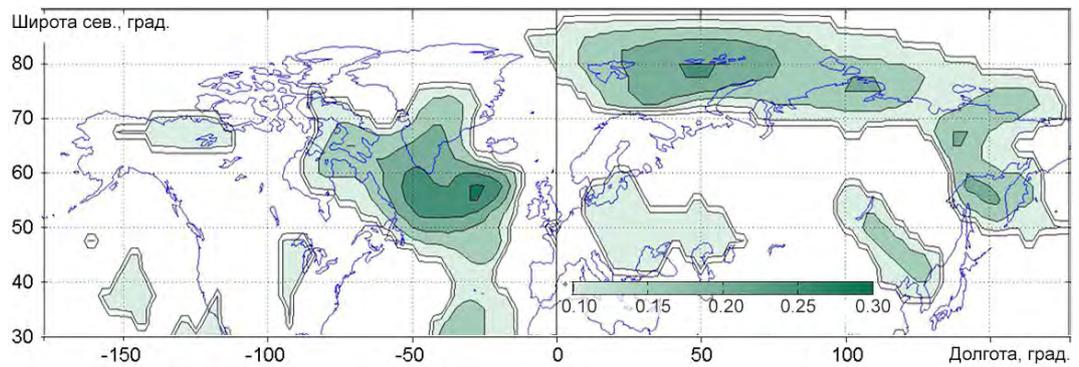


Рис. 7. Поле информативности параметра f_2 на карте северного полушария (синхронное, январь 1980–2015 гг.).

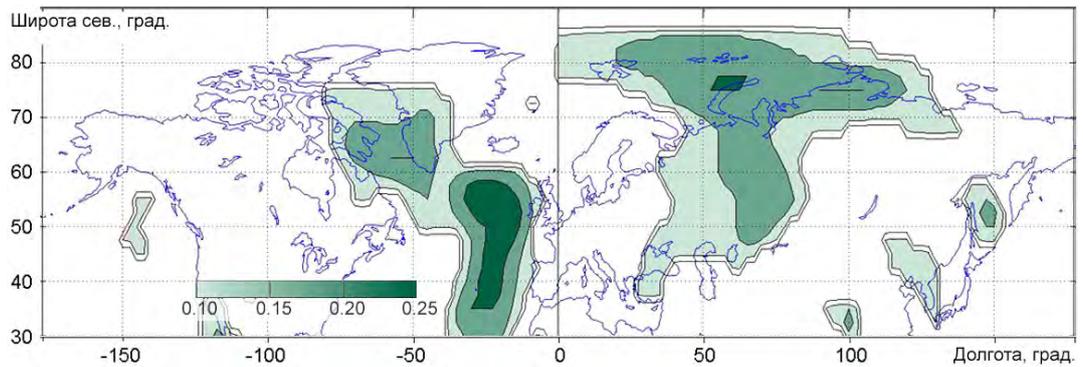


Рис. 8. Поле информативности параметра f_2 на карте северного полушария (сдвиг 4 суток, январь 1980–2015 гг.).

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРА ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ
НА УРОВНЕ 100 ГПА

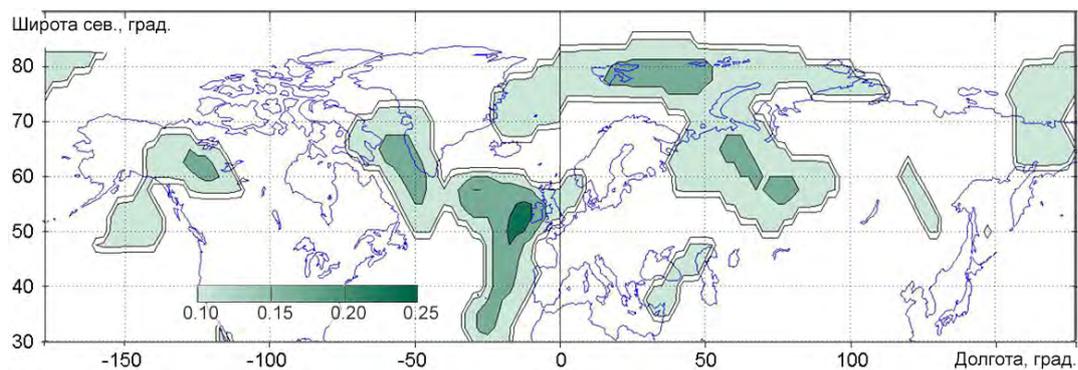


Рис. 9. Поле информативности параметра f_2 на карте северного полушария (сдвиг 7 суток, январь 1980–2015 гг.).

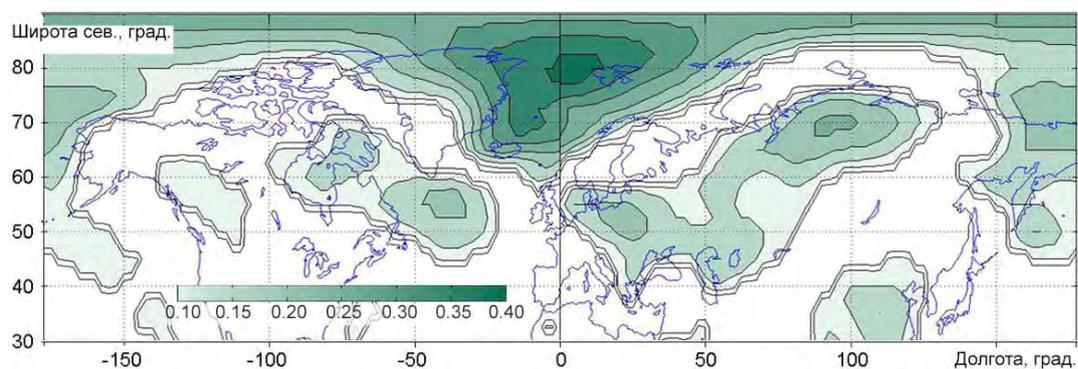


Рис. 10. Поле информативности параметра f_3 на карте северного полушария (синхронное, январь 1980–2015 гг.).

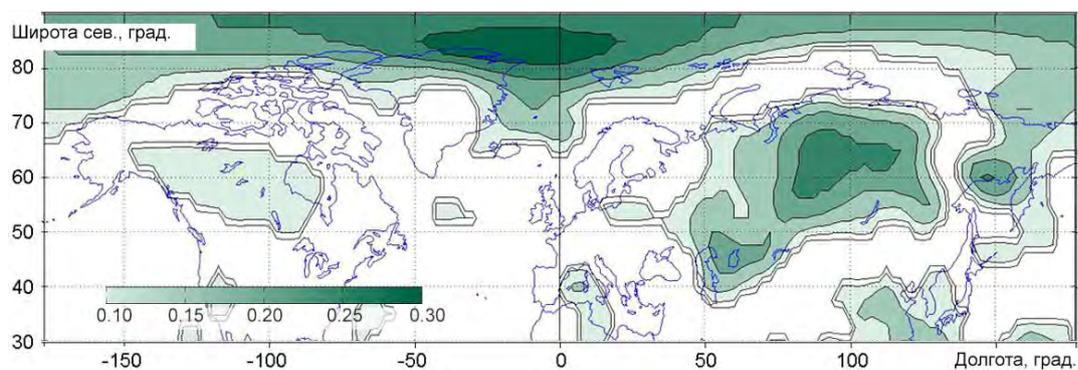


Рис. 11. Поле информативности параметра f_3 на карте северного полушария (сдвиг 4 суток, январь 1980–2015 гг.).

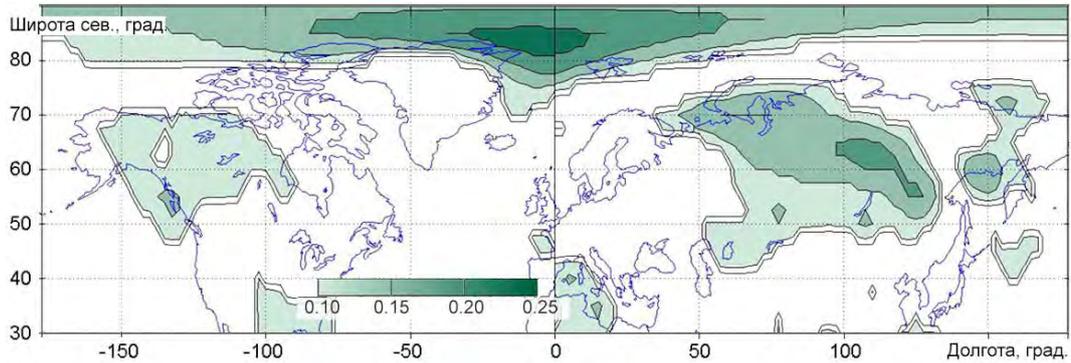


Рис. 12. Поле информативности параметра f_3 на карте северного полушария (сдвиг 7 суток, январь 1980–2015 гг.).

Как следует из анализа полей оценок коэффициентов корреляции, наибольшую по площади информативность имеют параметры: f_2 – координата y_c центра циркуляции и f_3 – значение лапласиана в центре циркуляции (x_c, y_c).

По рис. 4–12 можно отметить, что информативность характеристик центра циркуляции на уровне 100 гПа носит избирательный характер – в самых различных районах Северного полушария. Информативность параметров прослеживается и по мере увеличения сдвига по времени (до 7 суток), при этом несколько изменяются районы влияния (смещение, изменение конфигурации), величина информативности снижается незначительно. Кроме того, следует, что для температуры воздуха на территории Российской Федерации информативны все параметры ЦПВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Циркуляция атмосферы главный фактор, оказывающий влияние на формирование и пространственное распределение всех метеорологических параметров. Поэтому модельные характеристики структурных объектов общей циркуляции атмосферы можно использовать в качестве предикторов для диагноза и прогноза требуемой метеоинформации.

Отмечается, что с высотой значение центра циркуляции возрастает [2]. Поэтому для отыскания связей центра циркуляции с различными элементами погоды необходима информация с более высоких слоев атмосферы. Этому отвечает построенная модель ЦПВ на изобарическом уровне 100 гПа.

Таким образом, в данной работе предлагается модифицированная модель ЦПВ, отличающаяся от известных моделей использованием поля H_{100} и включением дополнительных параметров (кроме характеристик центра масс, условной массы, площади и др.) – координат центра циркуляции, параметров оси ложбины, лапласиана. Программная реализация и использование комплекса характеристик модели в качестве предикторов позволят более полно и оперативно отражать особенности атмосферной циркуляции над полушарием в схемах метеорологических прогнозов и моделях климатической системы.

Список литературы

1. *Багров Н.А.* О центре циркуляции // *Метеорология и гидрология*. 1975. № 2. С. 3–11.
2. *Багров Н.А.* К вопросу определения центра циркуляции атмосферы // *Труды Гидрометцентра СССР: Статистические методы долгосрочного прогноза погоды*. Л.: Гидрометеиздат, 1978. Вып. 211. С. 3–14.
3. *Глызь Г.А.* О некоторых характеристиках циркумполярного вихря // *Труды ВНИИГМИ-МЦД: Статистические методы анализа и прогноза в метеорологии*. М.: Гидрометеиздат, 1979. Вып. 58. С. 98–104.
4. *Нестерова Г.А.* Статистический анализ ежедневных данных характеристик циркумполярного вихря // *Труды ГМЦ: Вероятностные метеорологические прогнозы и мониторинг климата*. Л.: Гидрометеиздат, 1987. Вып. 294. С. 125–132.
5. *Акимов Л.М., Шипко Ю.В., Задорожная Т.Н.* Характеристики вертикальной структуры циркумполярного вихря Северного полушария // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: География. Геоэкология. 2012. № 1. С. 89–93.
6. *Задорожная Т.Н., Шипко Ю.В., Малюков Е.А.* Совершенствование математической модели циркумполярного вихря северного полушария // *Вестник ВАИУ*. Воронеж: Изд.-полиграф. центр «Научная книга», 2010. № 4 (11). С. 47–52.
7. *Педь Д.А.* Некоторые климатические особенности циркумполярного вихря северного полушария // *Труды Гидрометцентра СССР*. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Вып. 115. С. 25–44.
8. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis [Электронный ресурс]. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/pcd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html> (дата обращения: 5.08.2017).
9. *Акимов Л.М., Задорожная Т.Н.* Использование структурных особенностей циркумполярного вихря для прогноза температуры воздуха в отдельных регионах Северного полушария // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: География. Геоэкология. 2013. № 1. С. 67–73.
10. *Шипко Ю.В., Задорожная Т.Н., Малюков Е.А.* Моделирование атмосферных процессов северного полушария с оперативным определением краевой изогипсы // *Информатика: проблемы, методология, технологии: сб. материалов XI международной конференции*. Воронеж: ВГУ, 2011. С. 297–301.
11. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т.2: Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана / Пер. с англ. под ред. С.А. Айвазяна, Ю.Н. Тюрина. М.: Финансы и статистика, 1990. 526 с.
12. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология и основы предвычисления погоды. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1968. 776 с.
13. *Шипко Ю.В., Шувакин Е.В., Шувалов М.А.* Модель циркумполярного вихря северного полушария в терминах механики // *Информатика: проблемы, методология, технологии: сб. материалов XVII международной научно-методической конференции*. Воронеж: Изд-во «Научно-исследовательские публикации», 2017. Т.4. С. 91–96.

EVALUATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE CENTER
OF ATMOSPHERIC CIRCULATION AT LEVEL 100 HPA

Shipko Yu. V.¹, Shuvakin E. V.¹, Gedzenko D. V.¹, Neizhmak A. N.²

¹*Military Educational-Research Center of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (Voronezh), Russian Federation*

²*Krasnodar higher military aviation school of pilots, Krasnodar, Russian Federation*
E-mail: kubanec@inbox.ru, gdv555@pochta.ru

The article deals with the circumpolar vortex as an object describing the features of atmospheric circulation in the northern hemisphere. Its study allows to improve the quality of weather forecasts.

The analysis of existing studies of the circumpolar vortex is carried out. The choice of the circumpolar vortex as an object of study is substantiated. The use of information on circulation in the stratosphere will allow to solve the problems of meteorological parameters forecasting more successfully. The aim of the study is to improve the model of the circumpolar vortex. To achieve this goal, the problem of software definition of the characteristics of the center of the circumpolar vortex using algorithms for analyzing the fields of the geopotential height of the Isobaric level of 100 hPa is formulated. The source material used was reanalysis data from NCEP/DOE AMIP-II.

The existing models of the circumpolar vortex are analyzed. Their shortcomings are described and a comparative assessment of the models is carried out. As the parameter estimates of the selected model the displacement of the center of circulation relative to the actual center. The analysis and the obtained error values allowed to justify the choice of the surface of 100 hPa in the construction of the circumpolar vortex model.

A model of circumpolar vortex of 100 hPa level is proposed.

The algorithm for constructing a modified circumpolar vortex model includes the following steps:

calculation of the minimum value of H_{100} at a given latitude φ_0 ,

determination of the absolute minimum and its coordinates,

as an additional parameter of the model, the laplacian is included,

determination of the axis of the hollow of the circumpolar formation.

In this paper, we obtained and presented statistical estimates of the parameters of the model of the circumpolar vortex for the central months of winter and summer. The distribution of the circulation centers at the level of 100 hPa is presented in the polar coordinate system in the figure.

The evaluation of the informative characteristics of the center of circulation is carried out. The possibility of their use in the forecast of the surface air temperature field is estimated. The linear correlation coefficient is used as an indicator of informativeness.

The correlation dependence of the air temperature near the earth and the characteristics of the center of the circumpolar vortex for synchronous communication and with a time shift of 4 and 7 days is calculated. The distribution fields of the correlation coefficient are reflected. The most informative parameters are highlighted. The information content of the parameters is also observed as the time shift increases, while the areas of influence change slightly, the value of information content decreases slightly. In addition, all parameters of the circumpolar vortex are informative for air temperature in the Russian Federation.

The results obtained indicate the possibility of using the model characteristics of objects of General circulation of the atmosphere as predictors for the diagnosis and prediction of the required meteorological values.

Keywords: circumpolar vortex, circulation center, laplacian, hollow axis, air temperature.

References

14. Bagrov N.A. O centre cirkulyacii (About the center of circulation). *Meteorology and hydrology*, 2008, no. 2, pp. 3–11 (in Russian).
15. Bagrov N.A. K voprosu opredeleniya centra cirkulyacii atmosfery (To the problem of determining the center of the circulation of the atmosphere), in *Works of the USSR hydrometeorological center: Statistical methods of long-term weather forecast*. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1978, no. 211, pp. 3–14 (in Russian).
16. Glyz G.A. O nekotoryh harakteristikah cirkumpolyarnogo vihrya (On some characteristics of the circumpolar vortex), in *Proceedings of VNIIGMI-MCD: Statistical methods of analysis and forecasting in meteorology*. Moscow: Gidrometeoizdat (Publ.), 1979, no. 58, pp. 98–104 (in Russian).
17. Nesterova G.A. Statisticheskij analiz ezhednevnyh dannyh harakteristik cirkumpolyarnogo vihrya (Statistical analysis of daily data on the characteristics of the circumpolar vortex), in *Proceedings of GMC: Probabilistic weather forecasts and climate monitoring*. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1978, no. 294, pp. 125–132 (in Russian).
18. Akimov L.M., Shipko Yu.V., Zadorozhnaya T.N. Harakteristiki vertikalnoj struktury cirkumpolyarnogo vihrya severnogo polushariya (Characteristics of the vertical structure of the circumpolar vortex of the Northern hemisphere). *Bulletin of Voronezh state University. Series: Geography. Geoecology*. 2012, no. 1, pp. 89–93 (in Russian).
19. Zadorozhnaya T.N., Shipko Yu.V., Malyukov E.A. Sovershenstvovanie matematicheskoy modeli cirkumpolyarnogo vihrya severnogo polushariya (Improving the mathematical model of the circumpolar vortex of the Northern hemisphere). *Bulletin of VAIU. Voronezh: Publishing and printing center «Scientific book» (Publ.)*, 2010, no. 4 (11), pp. 47–52 (in Russian).
20. Ped D.A. Nekotorye klimaticheskie osobennosti cirkumpolyarnogo vihrya severnogo polushariya (Some climatic features of the circumpolar vortex of the Northern hemisphere), in *Works of the USSR hydrometeorological center*. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1973, no. 115, pp. 25–44 (in Russian).
21. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis [Electronic resource]. URL: [http:// www.esrl.noaa.gov/pcd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html](http://www.esrl.noaa.gov/pcd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html) (reference date: 5.08.2017).
22. Akimov L.M., Zadorozhnaya T.N. Ispolzovanie strukturnykh osobennostej cirkumpolyarnogo vihrya dlya prognoza temperatury vozduha v otdelnyh regionah severnogo polushariya (Use of structural features of the circumpolar vortex to predict air temperature in some regions of the Northern hemisphere). *Bulletin of Voronezh state University. Series: Geography. Geoecology*. 2013, no. 1, pp. 67–73 (in Russian).
23. Shipko Yu.V., Zadorozhnaya T.N., Malyukov E.A. Modelirovanie atmosferynykh processov severnogo polushariya s operativnym opredeleniem kraevoj izogipsy (Simulation of atmospheric processes in the northern hemisphere with an operational definition of the boundary isohypsum), in *Informatics: problems, methodology, technologies: proceedings of the XI international conference*. Voronezh: VSU (Publ.), 2011, pp. 297–301 (in Russian).
24. *Spravochnik po prikladnoj statistike (Handbook of applied statistics)*. V. 2: under the editorship E. Lloyd, W. Lederman. English translation edited by S.A. Ajvazyana, Yu.N. Tyurina. Moscow: Finance and statistics (Publ.), 1990. 526 p (in Russian).
25. Zverev A.S. *Sinopticheskaya meteorologiya i osnovy predvychnisleniya pogody (Synoptic meteorology and the basis for prediction of weather)*. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1968, 776 p (in Russian).
26. Shipko Yu.V., Shuvakin E.V., Shuvayev M.A. Model cirkumpolyarnogo vihrya severnogo polushariya v terminah mekhaniki (Model of circumpolar vortex of the Northern hemisphere in terms of mechanics), in *Informatics: problems, methodology, technologies: collection of materials of the XVII international scientific and methodical conference*. Voronezh: Publishing house «Scientific and research publications» (Publ.), 2017. V. 2, pp. 91–96 (in Russian).