



УДК 551.513:001.891.57
ГРНТИ 37.21.37

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛИ ЦИРКУМПОЛЯРНОГО ВИХРЯ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ НА УРОВНЕ 100 ГПА

*Ю.В. ШИПКО, кандидат технических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
И.В. ПРИХОДЬКО
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
С.А. КУЗНЕЦОВ
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Рассматривается модель циркумполярного вихря северного полушария на изобарическом уровне 100 гПа. На базе данных реанализа параметров атмосферы за 1980–2015 гг. рассчитаны статистические оценки характеристик модели для января и июля. Выявлены тенденции параметров атмосферной циркуляции с использованием подхода скользящих 15-летних периодов. Проведена оценка корреляционной зависимости (синхронной) параметров циркумполярного вихря и приземной температуры воздуха.

Ключевые слова: циркумполярный вихрь; модель; центр циркуляции; температура воздуха; реанализ.

THE NORTHERN HEMISPHERE CIRCUMPOLAR VORTEX MODEL CHARACTERISTICS AT THE 100 HPA LEVEL

*YU.V. SHIPKO, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
I.V. PRIKHOD'KO
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
S.A. KUZNETSOV
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

A model of the circumpolar vortex of the northern hemisphere at the isobaric level of 100 HPA is considered. Statistical estimates of the model characteristics for January and July are calculated on the basis of re-analysis of the atmosphere parameters for 1980-2015. The trends of atmospheric circulation parameters using the approach of sliding 15-year periods are revealed. The correlation dependence of (synchronous) parameters of the circumpolar vortex and surface air temperature is estimated.

Keywords: circumpolar vortex; model; center of circulation; air temperature; reanalysis.

Введение. Основным звеном атмосферной циркуляции северного полушария является циркумполярный вихрь (ЦПВ) с центром в районе полюса и западно-восточным движением воздуха. Его характеристики существенно влияют на формирование и распределение различных параметров атмосферы. Поэтому надежное метеорологическое обеспечение Воздушно-космических сил невозможно без всестороннего изучения особенностей этой компоненты общей циркуляции атмосферы.

Изучению ЦПВ уделено значительное внимание [1–5], предложены различные модели, формулировки параметров (географического положения центра, интенсивности и др.), которые используются в качестве показателей общего состояния циркуляции в климатическом аспекте и в схемах прогнозирования. Основные подходы к прогнозированию базируются на использовании информации о циркуляции в нижней или средней тропосфере [2, 3], вместе с тем, много-



численные исследования показывают, что значительную роль в формировании приземной погоды играют и процессы, происходящие в более высоких слоях атмосферы, в частности, в стратосфере. Отмечается возрастание с высотой значения центра циркуляции атмосферы [2, 5], поэтому для отыскания связей центра циркуляции с различными метеорологическими величинами необходима информация ЦПВ с более высоких слоев атмосферы. В работе рассматривается модель ЦПВ на изобарическом уровне 100 гПа.

Исходная информация – данные реанализа параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II [6, 7] за 1980–2015 гг. для центральных месяцев зимнего и летнего сезонов. Используются среднесуточные значения (в узлах регулярной сетки с шагом $2,5^\circ$ по широте и долготе) полей геопотенциальной высоты уровня 100 гПа и приземной температуры воздуха на уровне 1000 гПа, рассчитанные по 4-х срочным данным.

Базовая модель ЦПВ. В качестве базовой используется модель ЦПВ [2, 3], определяющая аналогию между проекцией поверхности геопотенциальной высоты H (на уровне 500 гПа) на плоскость XOY и двумерным распределением на этой плоскости случайных величин X, Y с весами p_{ij} , которые интерпретируются как условные «массы» точек (x_i, y_j) . Веса проекций элементов объема «чаши», образованной топографией изобарической поверхности и горизонтальной плоскостью, проходящей через краевую изогипсу H_0 , определяются по формуле [3]:

$$p_{ij} = \frac{(H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i}{\sum_i \sum_j (H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i}, \quad (1)$$

где H_{ij} – значение высоты изобарической поверхности в узле (x_i, y_j) , φ_i – широта точки (x_i, y_j) ; учитываются только точки (узлы), для которых выполняется условие $H_{ij} < H_0$.

Используемая декартова система координат XOY представляется в плоскости экватора, где центр совмещен с центром Земли, ось X направлена к нулевому меридиану, ось Y – на восток (90° з.д. – 90° в.д.).

Характеристиками модели вихря являются: площадь S , ограниченная с юга краевой изогипсой H_0 , условная «масса» M рассматриваемого объема и их отношение z (плотность ЦПВ):

$$S = r^2 \Delta\varphi \Delta\lambda \sum_i \sum_j \cos \varphi_i, \quad M = r^2 \Delta\varphi \Delta\lambda \sum_i \sum_j (H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i, \quad (2)$$

где r – радиус Земли; $\Delta\varphi, \Delta\lambda$ – шаги по меридиану и параллели, выделяющие элементарную площадку S_{ij} (в случае данных реанализа NCEP – $2,5^\circ$ по широте и долготе).

Геометрической характеристикой концентрации двумерного распределения около центра масс является эллипс рассеяния; угол между главной осью эллипса и осью X определяется углом θ [2, 3], $\operatorname{tg} 2\theta = 2\rho\sigma_x\sigma_y/(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)$, где ρ, σ_x, σ_y – коэффициент корреляции и средние квадратические отклонения величин X, Y рассматриваемого распределения соответственно. От величин σ_x, σ_y можно перейти к главным средним квадратическим отклонениям σ_u, σ_v [2, 3]:

$$\sigma_{u/v}^2 = \frac{1}{2} \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 \pm \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\rho^2 \sigma_x^2 \sigma_y^2} \right]. \quad (3)$$

Как характеристика формы двумерного распределения «масс» используется коэффициент сжатия эллипса $k = \sigma_v / \sigma_u$.

В базовой модели ЦПВ уровня 500 гПа [2, 3] краевая изогипса H_0 выбирается совпадающей с осью планетарной высотной фронтальной зоны и принимающей постоянное значение для определенного месяца. Однако такой выбор H_0 имеет некоторую неопределенность, вопрос о положении центра ЦПВ однозначно не решается. Кроме того, базовая модель уровня 500 гПа



дает в среднем сравнительно большие отклонения модельных центров циркуляции от фактических, поскольку околополюсная циркуляция в тропосфере распадается на несколько центров и первая замкнутая изогипса, охватывающая частные центры, дает значительное смещение оценки центра циркуляции. Предлагаемая к использованию поверхность геопотенциальной высоты уровня 100 гПа имеет только один глобальный для полушария минимум.

Модифицированная модель ЦПВ. При построении модели ЦПВ на изобарическом уровне 100 гПа используется следующий подход. Анализируется поверхность геопотенциальной высоты, ограниченная определенной широтой $\varphi_0 = 40$ град. Алгоритм построения модели включает следующие последовательные процедуры.

1) Расчет минимального значения поля H_{100} на заданной широте φ_0 , которое принимается за краевую изогипсу H_0 .

2) Определение в области значений геопотенциальной высоты $H_{100} \leq H_0$ минимума (H_c) и координат его положения (x_c, y_c). Данное значение принимается за центр циркуляции.

3) Определение оси ложбины циркумполярного образования. При этом используется подход [8] определения угла β положения оси ложбины относительно оси OX .

4) Расчет параметров модели: $S, M, z, \theta, \sigma_u, \sigma_v, k$. Для более полного описания ЦПВ в качестве дополнительного параметра включен лапласиан $\nabla^2 H$ [9] в центре циркуляции (x_c, y_c).

Полученные статистические оценки (климатические характеристики) параметров ЦПВ на уровне 100 гПа для января и июля представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Статистические оценки параметров модели ЦПВ на уровне 100 гПа

Параметр ЦПВ	Январь		Июль	
	Средняя	Среднее квадратическое отклонение	Средняя	Среднее квадратическое отклонение
x_c , км	214,2	855,9	205,3	1577,4
y_c , км	177,0	1663,1	-1027,4	1282,4
$\nabla^2 H$, дам/км ²	0,0034	0,0026	0,0016	0,0009
β , град.	95,4	13,5	96,9	20,5
$S \cdot 10^{-6}$, км ²	55,9	9,1	47,3	12,1
$M \cdot 10^{-9}$, км ² дам	2,17	0,72	0,43	0,20
z , дам	38,02	8,85	8,67	2,50
θ , град.	7,5	24,8	-4,0	22,4
σ_u , км	2049,3	207,2	2021,4	266,9
σ_v , км	1403,0	191,0	1454,4	257,7
k	0,69	0,13	0,73	0,13

Как следует из данных таблицы 1, среднее положение центра циркуляции в январе соответствует восточному полушарию, в июле – западному. Распределение центров циркуляции (x_c, y_c) на уровне 100 гПа, определенных как минимумы поверхностей H_{100} , представлено в полярной системе координат на рисунке 1.

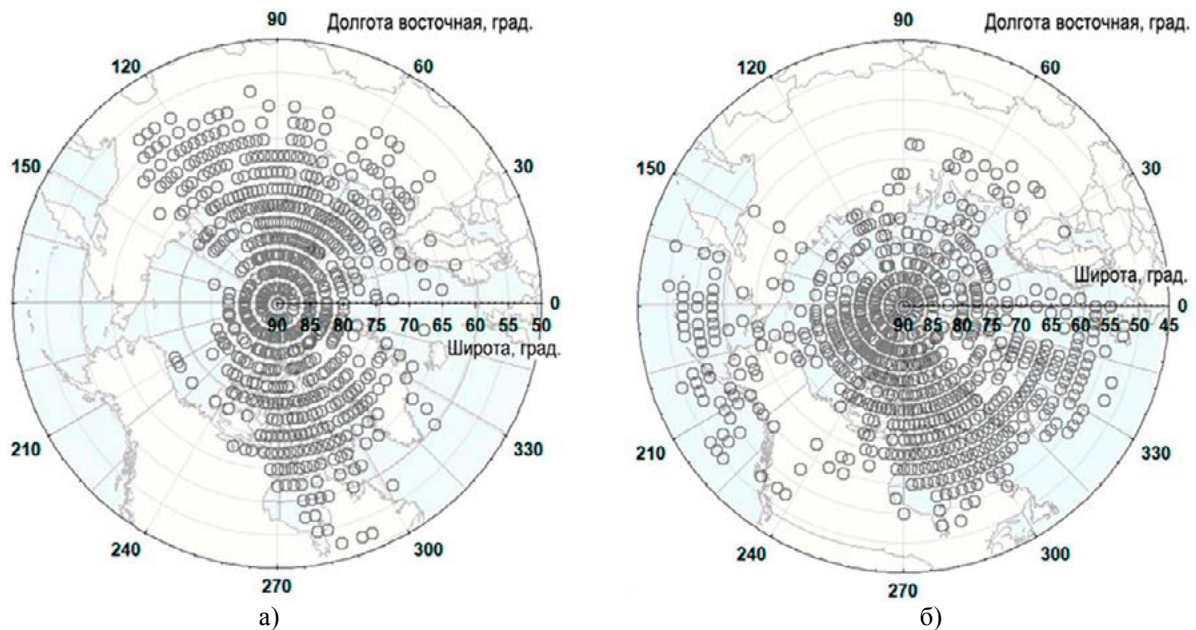


Рисунок 1 – Распределение центров ЦПВ уровня 100 гПа
а) январь; б) июль

Гистограммы распределения некоторых параметров ЦПВ даны на рисунках 2–5. Например, как видно из рисунка 5, гистограммы распределения лапласиана $\nabla^2 H$, количественно характеризующего значение вертикальной составляющей вихря скорости, в январе и июле резко отличаются, среднее значение января почти в два раза превышает значение в июле (таблица 1).

Условные площадь, масса, интенсивность ЦПВ на уровне 100 гПа заметно больше в январе, чем в июле, что соответствует большей выраженности ЦПВ в зимний период.

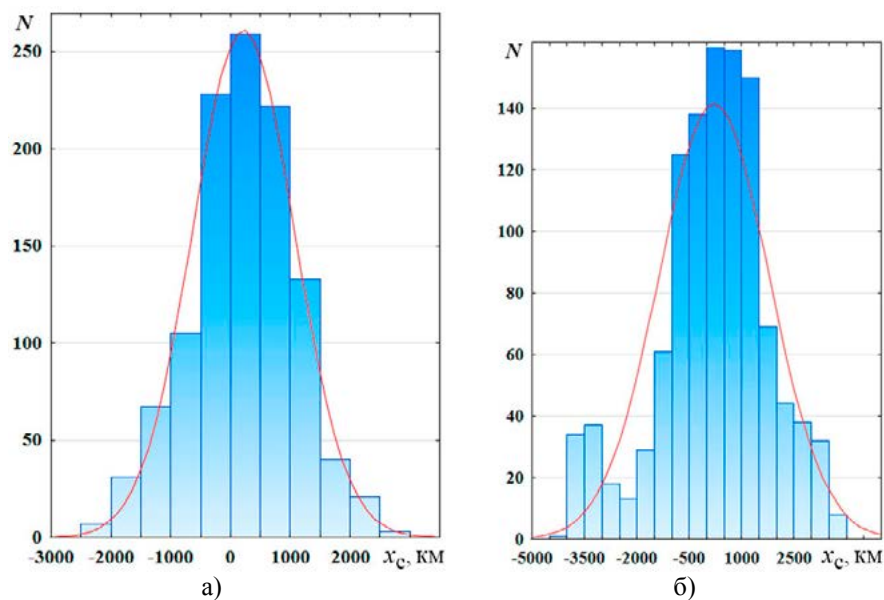


Рисунок 2 – Гистограммы распределения координаты x_c центра циркуляции
а) январь; б) июль

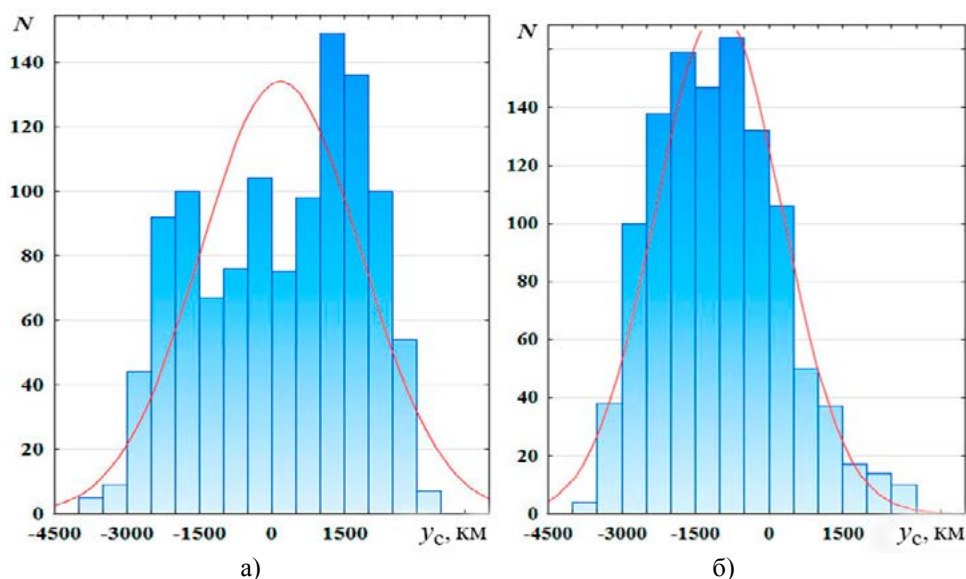


Рисунок 3 – Гистограммы распределения координаты y_c центра циркуляции
а) январь; б) июль

Распределения угла θ показывают, что главная ось эллипса рассеяния масс ЦПВ в январе в среднем имеет направления в восточном полушарии, в июле – в западном.

Характеристики σ_u , σ_v , k эллипса рассеяния масс ЦПВ для января и июля также имеют статистически значимое различие (на уровне значимости $\alpha = 0,05$).

Проведен анализ динамики параметров циркумполярной циркуляции с использованием подхода скользящих 15-летних периодов. На рисунках 6–8 представлены результаты анализа для января, подтверждающие выявленные тенденции периода 1980–2015 гг. (На рисунках 6–8 указаны коэффициенты детерминации R^2 , характеризующие качество аппроксимации зависимостей линейным трендом).

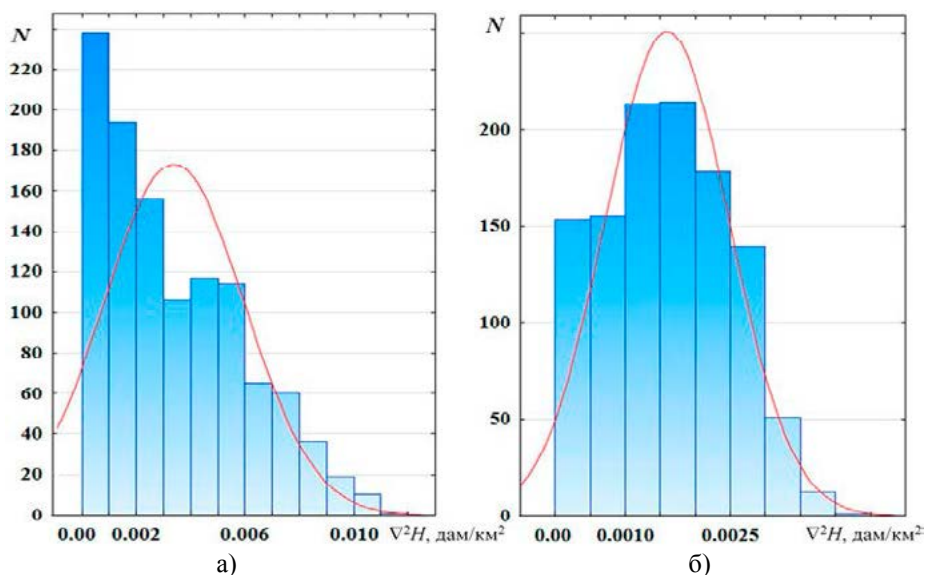


Рисунок 4 – Гистограммы распределения значения лапласиана в центре циркуляции
а) январь; б) июль

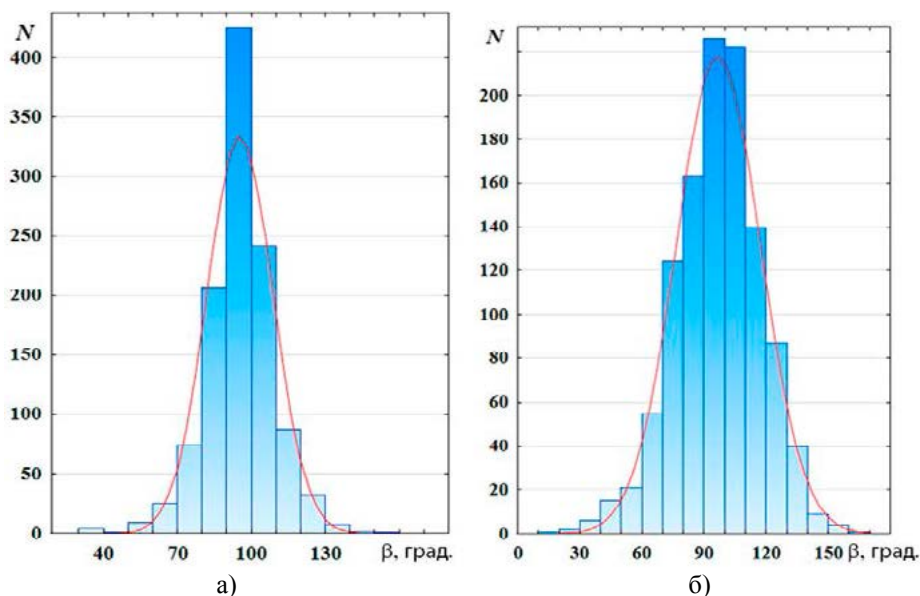


Рисунок 5 – Гистограммы распределения угла β положения оси ложбины ЦПВ
а) январь; б) июль

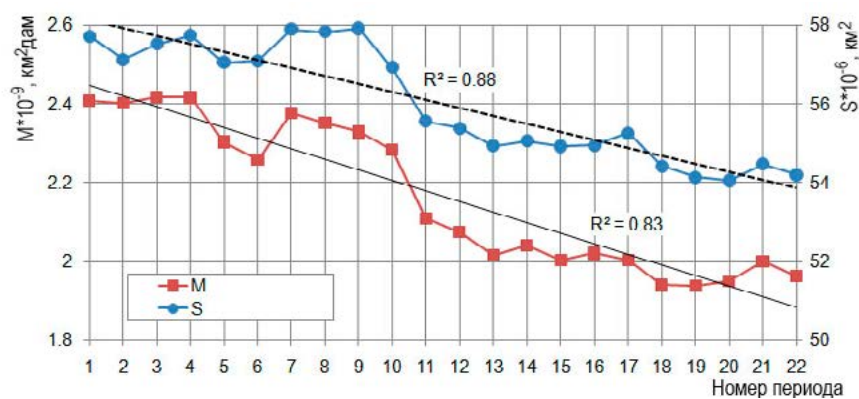


Рисунок 6 – Ход средних значений площади и массы ЦПВ
скользящих 15-летних периодов (январь)

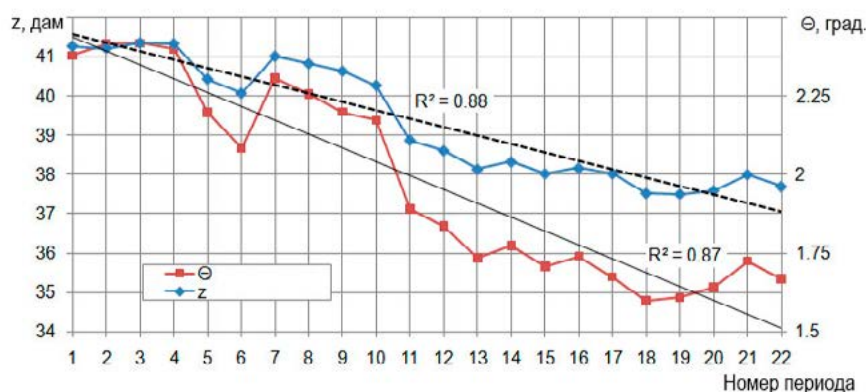


Рисунок 7 – Ход средних значений интенсивности вихря и угла положения
главной оси эллипса рассеяния масс ЦПВ скользящих 15-летних периодов (январь)

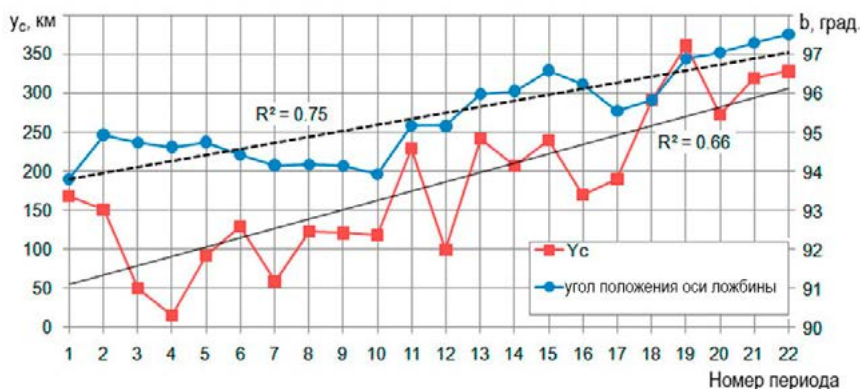


Рисунок 8 – Ход средних значений угла положения ложбины ЦПВ и координаты u_c центра циркуляции скользящих 15-летних периодов (январь)

Как отражено на рисунке 6, для января имеют место тенденции снижения (в среднем) условных площади и массы ЦПВ, а также интенсивности вихря (рисунок 7). Согласно рисунку 8, в январе отмечается тенденция поворота (в среднем) в сторону западного полушария главной оси эллипса рассеяния условных масс ЦПВ. Как показано на рисунке 8, наблюдается динамика роста значений координаты u_c , что соответствует восточному переносу (в среднем) центра циркуляции, и тенденция поворота (в среднем) угла положения оси ложбины ЦПВ.

Описанные выше параметры ЦПВ могут быть использованы в качестве предикторов в прогностических схемах. Поэтому требуется выявить их информативность в отношении поля приземной температуры воздуха.

Проведена оценка синхронных связей между параметрами ЦПВ уровня 100 гПа и среднесуточными значениями приземной температуры воздуха T_{ij} на уровне 1000 гПа в узлах регулярной сетки. В качестве показателя информативности параметра вихря f_k в узле регулярной сетки (φ_i, λ_j) использовался линейный коэффициент корреляции [10]:

$$r_{ijk} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \left(\frac{f_{km} - \bar{f}_k}{\sigma_{f_k}} \right) \left(\frac{T_{ijm} - \bar{T}_{ij}}{\sigma_{T_{ij}}} \right), \quad (4)$$

где n – объем выборки; f_{km} , \bar{f}_k , σ_{f_k} – соответственно выборочное значение, среднее и среднее квадратическое отклонение параметра f_k модели ЦПВ уровня 100 гПа; T_{ijm} , \bar{T}_{ij} , $\sigma_{T_{ij}}$ – соответственно выборочное значение, среднее и среднее квадратическое отклонение приземной температуры воздуха в точке (φ_i, λ_j) .

Значимость оценки коэффициента корреляции r^* между температурой и параметрами ЦПВ, проверялась выдвижением гипотезы $H_0: r_{ijk} = 0$, при условии [10]:

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

где $t_{кр}(\alpha, \nu)$ – критическая точка распределения Стьюдента с $\nu = n - 2$ степенями свободы уровня значимости α . При используемом объеме выборки нулевая гипотеза отвергается при $|r^*| > 0,07$ (при $\alpha = 0,025$).

Проведенные расчеты корреляционной зависимости приземной температуры воздуха и параметров моделей ЦПВ позволили отобразить поля информативности на карте северного полушария (использовался инструментальный системы MATLAB [11]).



Для примера на рисунках 9–12 представлены поля оценок коэффициента корреляции для координат x_c , y_c и лапласиана $\nabla^2 H$ в центре ЦПВ в синхронные сроки (на рисунках отражены только узлы регулярной сетки, где $|r^*| > 0,1$).

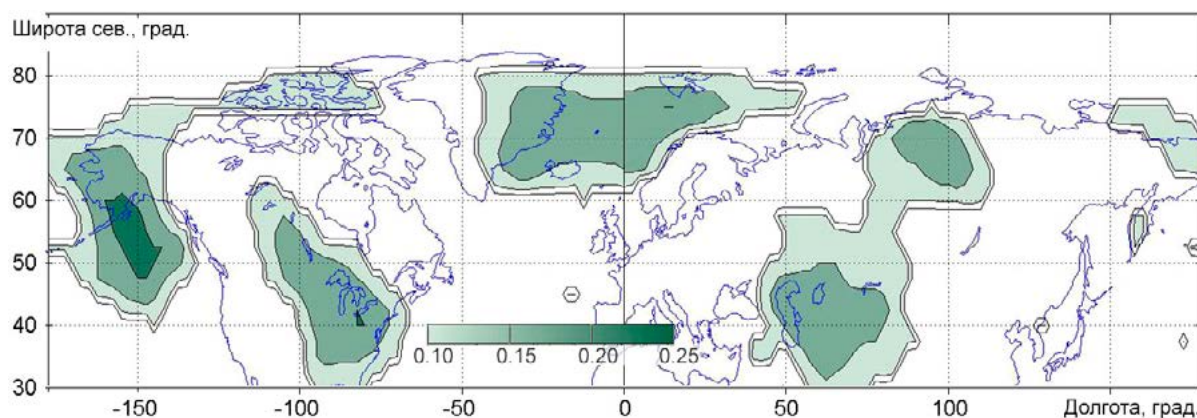


Рисунок 9 – Поле информативности параметра x_c ЦПВ на карте северного полушария (синхронное, январь 1980–2015 гг.)

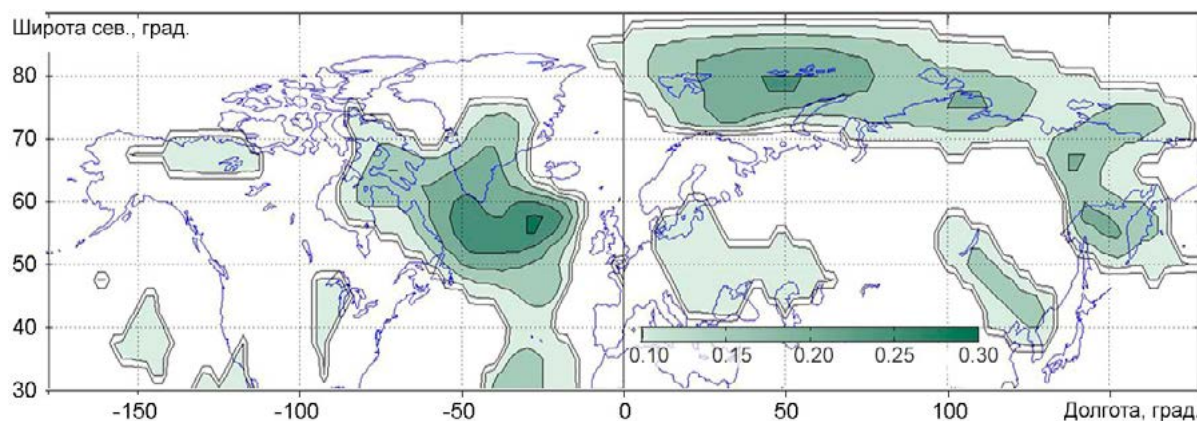


Рисунок 10 – Поле информативности параметра y_c ЦПВ на карте северного полушария (синхронное, январь 1980–2015 гг.)

По рисункам 9–12 можно отметить, что информативность характеристик центра циркуляции уровня 100 гПа носит избирательный характер (проявляется в самых различных районах северного полушария). Кроме того, на территории России для приземной температуры воздуха информативны все параметры ЦПВ уровня 100 гПа.

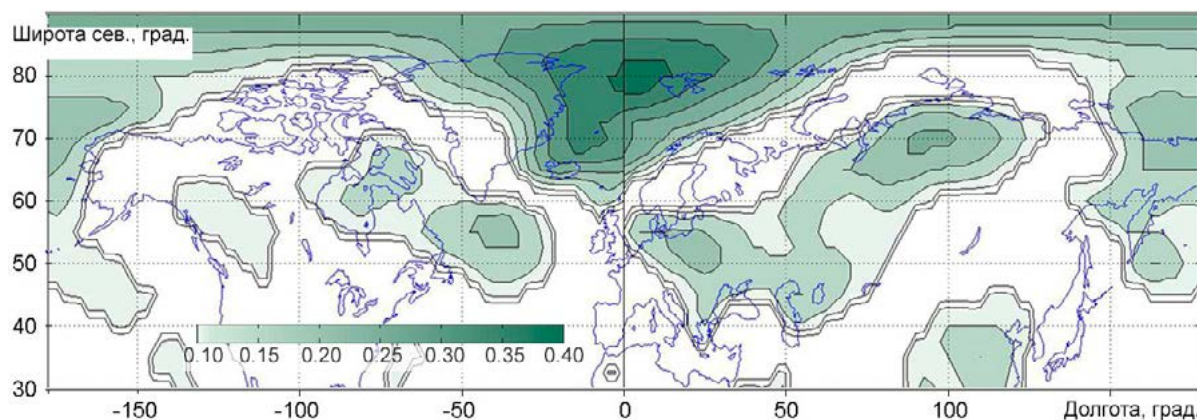


Рисунок 11 – Поле информативности лапласиана $\nabla^2 H$ в центре циркуляции на карте северного полушария (синхронное, январь 1980–2015 гг.)

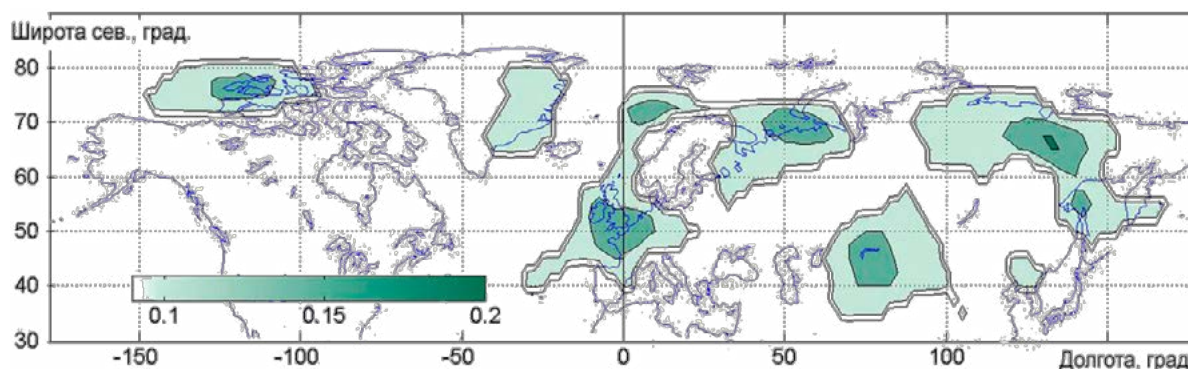


Рисунок 12 – Поле информативности параметра β положения оси ложбины ЦПВ на карте северного полушария (синхронное, январь 1980–2015 гг.)

Заключение. В данном исследовании предлагается модифицированная модель ЦПВ, отличающаяся от известных моделей использованием поля геопотенциальной высоты H_{100} и включением дополнительных параметров (кроме характеристик центра масс, условной массы, площади и др.) – координат центра циркуляции, параметра оси ложбины, лапласиана в центре циркуляции.

Разработанная программная реализация моделирования циркумполярной циркуляции на уровне 100 гПа и использование комплекса характеристик модели в качестве предикторов позволят более полно и оперативно отражать особенности атмосферной циркуляции над полушарием в схемах метеорологических прогнозов, моделях климатической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багров Н.А. О центре циркуляции // Метеорология и гидрология, 1975. № 2. С. 3–11.
2. Багров Н.А., Орлова И.И. К вопросу определения центра циркуляции атмосферы // Труды ГМЦ. Вып. 211: Статистические методы долгосрочного прогноза погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С. 3–14.
3. Глызь Г.А. О некоторых характеристиках циркумполярного вихря // Труды ВНИИГМИ-МЦД, Вып. 58. М.: Гидрометеиздат, 1979. С. 98–104.
4. Нестерова Г.А., Каткова Т.Ф. Статистический анализ ежедневных данных характеристик циркумполярного вихря // Труды ГМЦ. Вып. 294. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 125–132.
5. Педь Д.А. Некоторые климатические особенности циркумполярного вихря северного полушария // Труды ГМЦ. Вып. 115. Л.: Гидрометеиздат, 1973. С. 25–44.
6. Kanamitsu M. et al. NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. American Meteor. Soc., 2002. V. 83. P. 1631–1643.
7. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis [Электронный ресурс]. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/pcd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html> (дата обращения: 22.11.2017).
8. Шипко Ю.В., Шувакин Е.В. Шуваев М.А. Модель циркумполярного вихря северного полушария в терминах механики // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XVII Международной научно-методической конференции, Воронеж, 9–10 февраля 2017 г. Воронеж: Изд-во «Научно-исследовательские публикации», 2017. Т.4. С. 91–96.
9. Зверев А.С. Синоптическая метеорология и основы предвычисления погоды. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1968. 776 с.
10. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т. 2 / Пер. с англ. Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, С.А. Айвазяна, Ю.Н. Тюрина. М.: Финансы и статистика, 1990. 528 с.
11. Дьяконов В.П. МАТЛАВ: Полный самоучитель. М.: ДМК-Пресс, 2012. 768 с.



REFERENCES

1. Bagrov N.A. O tsentre tsirkulyatsii // *Meteorologiya i gidrologiya*, 1975. № 2. P. 3–11.
2. Bagrov N.A., Orlova I.I. K voprosu opredeleniya tsentra tsirkulyatsii atmosfery // *Trudy GMTS. Vyp. 211: Statisticheskie metody dolgosrochnogo prognoza pogody*. L.: Gidrometeoizdat, 1978. P. 3–14.
3. Glyz' G.A. O nekotorykh kharakteristikakh tsirkumpolyarnogo vikhrya // *Trudy VNIIGMI-MTSD, Vyp. 58*. M.: Gidrometeoizdat, 1979. P. 98–104.
4. Nesterova G.A., Katkova T.F. Statisticheskij analiz ezhednevnykh dannyx kharakteristik tsirkumpolyarnogo vikhrya // *Trudy GMTS. Vyp. 294*. L.: Gidrometeoizdat, 1987. P. 125–132.
5. Ped' D.A. Nekotorye klimaticheskie osobennosti tsirkumpolyarnogo vikhrya severnogo polushariya // *Trudy GMTS. Vyp. 115*. L.: Gidrometeoizdat, 1973. P. 25–44.
6. Kanamitsu M. et al. NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bull. American Meteor. Soc.*, 2002. V. 83. P. 1631–1643.
7. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/pcd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html> (data obrashheniya: 22.11.2017).
8. SHipko YU.V., SHuvakin E.V. SHuvaev M.A. Model' tsirkumpolyarnogo vikhrya severnogo polusha-riya v terminakh mekhaniki // *Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferentsii, Voronezh, 9–10 fevralya 2017 g.* Voronezh: Izd-vo «Nauchno-issledovatel'skie publikatsii», 2017. T.4. P. 91–96.
9. Zverev A.S. Sinopticheskaya meteorologiya i osnovy predvychisleniya pogody. L.: Gidrometeorologicheskoe izd-vo, 1968. 776 p.
10. Spravochnik po prikladnoj statistike. V 2-kh t. T. 2 / Per. s angl. Pod red. EH. Lloyda, U. Ledermana, S.A. Ajvazyana, YU.N. Tyurina. M.: Finansy i statistika, 1990. 528 p.
11. D'yakonov V.P. MATLAB: Polnyj samouchitel'. M.: DMK-Press, 2012. 768 p.

© Шипко Ю.В., Приходько И.В., Кузнецов С.А., 2018

Шипко Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, yshipko@mail.ru

Приходько Инна Владимировна, научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, prikhodko84@mail.ru

Кузнецов Станислав Александрович, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, mastersoft@bk.ru