DOI: 10.17117/na.2015.08.1183

Поступила (Received): 22.08.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.08.1183.pdf>

Задорожная Т.Н., Закусилов В.П. Оценка заблаговременности прогноза среднемесячной температуры воздуха на основе использования параметров циркумполярного вихря

Zadorozhnaja T.N., Zakusilov V.P.
**Evaluation of lead time mean monthly air temperature on
the basis of the parameters of the circumpolar vortex**

В работе рассматриваются структурные особенности циркумполярного вихря в качестве предикторов для прогноза средней месячной температуры воздуха в различных регионах северного полушария. Предложена регрессионная модель прогноза с заблаговременностью до одного месяца, представлены оценки успешности

Ключевые слова: среднемесячная температура, региональный прогноз, северное полушарие, циркумполярный вихрь, заблаговременность прогноза

Задорожная Тамара Николаевна

Кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник

Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 А

Закусилов Вадим Павлович

Кандидат географических наук, доцент

Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 А

The paper examines the structural features of the circumpolar vortex as predictors to predict the average monthly air temperature in different regions of the Northern hemisphere. The proposed regression model forecasts with lead times up to one month, presents estimates of success

Key words: average monthly temperature, the regional forecast, Northern hemisphere, circumpolar vortex, forecast lead time

Zadorozhnaja Tamara Nikolaevna

Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor, Senior Researcher

Air force academy named N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin

Voronezh, Old Bolsheviks st., 54 A

Zakusilov Vadim Pavlovich

Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor

Air force academy named N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin

Voronezh, Old Bolsheviks st., 54 A

Устойчивое развитие экономики отдельных регионов и страны в целом, обеспечивающее безопасность РФ, невозможно без учета метеорологических факторов. Возникающие в различных регионах планеты экстремальные погодные ситуации и стихийные бедствия, существенным образом отражаются на выполнении поставленных задач, благосостоянии населения, экологических, экономических и социальных аспектах функционирования различных государств. В связи с этим, одной из важнейших задач XXI века, выдвинутых в

Климатической доктрине РФ, является проблема изучения и прогноза глобальных и региональных колебаний погодных условий.

Указанные проблемы предопределяют необходимость изучения ключевых факторов долгосрочного прогнозирования для выработки рекомендаций по устойчивому развитию погодо-зависимых отраслей экономики.

Анализ существующих методов долгосрочного прогноза показал, что в преобладающем количестве случаев, основным фактором, влияющим на погодные условия, является атмосферная циркуляция, на которую в своих трудах указывал еще М.В. Ломоносов. Трудности ее использования заключаются в том, чтобы малым количеством используемых параметров, наиболее полно отразить реальное состояние фактического процесса. В целях выхода из этой ситуации в различное время предлагались различные численные показатели (индексы) [1–3], используемые в качестве предикторов при разработке долгосрочных прогнозов погоды, коэффициенты разложения по различным составляющим [4–6]]. Однако, описание циркуляции подобным образом является слишком приближенным.

В предлагаемом исследовании авторы исходили из того, что показателем общей циркуляции атмосферы является циркумполярный вихрь (ЦПВ). На наш взгляд, довольно полный перечень параметров, способных объективно описать реальное состояние циркумполярного вихря приводится в работах [7, 8]. В качестве таких параметров рассматриваются:

1. *Местоположение полюса циркуляции относительно географического полюса X_c , Y_c .* В упомянутой работе циркуляция представляется как проекция на поверхность Земли центра масс объема чаши, образованной топографией некоторой изобарической поверхности и горизонтальной плоскостью, проходящей через краевую изогипсу вихря H_0 .

Рис. 1. Схема модели центра массы циркумполярного вихря

На рисунке линия AC_1B является линией пересечения изобарической поверхности (дна чаши) с вертикальной плоскостью, а прямая AB представляет поверхность «зеркала» чаши. Точка O есть центр объема чаши, а ее проекция на поверхность Земли и будет центром циркуляции. Центр циркуляции, как

центр масс системы материальных точек, согласно формулам, принятым в механике, определяется следующим образом:

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

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

где r – радиус Земли (принимается равным 6370 км); φ_i, λ_j – географические координаты: широта и долгота точки (x_i, y_j) ; H_{ij} – высота изобарической поверхности в точке (x_i, y_j) ; H_o – значение краевой изогипсы.

2. *Площадь циркумполярного вихря S*. Она указывает на размер территории Северного полушария, в которой заключена циклоническая циркуляция. Расчет площади S производился по формуле:

$$S = r^2 \Delta \varphi \Delta \lambda \sum_i \sum_j \cos \varphi_i, \quad (3)$$

где $\Delta \varphi, \Delta \lambda$ – шаги по меридиану и параллели, выделяющие элементарную площадку S_{ij} .

3. *Масса атмосферы M*, рассматриваемого объема, ограниченная определенной поверхностью и изогипсой H_o :

$$M = r^2 \Delta \varphi \Delta \lambda \sum_i \sum_j (H_o - H_{ij}) \cos \varphi_i, \quad (4)$$

где r – радиус Земли; H_o – значение краевой изогипсы; H_{ij} – высота той же изобарической поверхности в точке с координатами φ, λ ; $\Delta \varphi$ и $\Delta \lambda$ – постоянные приращения координат, в данном случае в радианной мере ($\Delta \theta = \pi/36$ и $\Delta \lambda = \pi/18$).

4. *Интенсивность циркуляции Z*. Рассчитывается как отношение массы атмосферы M к площади вихря S , по формуле:

$$Z = M / S, \quad (5)$$

5. *Геометрические характеристики вихря*. В качестве геометрической характеристики является эллипс рассеивания, представленный на рисунке 2. Он является геометрической характеристикой концентрации двумерного распределения около его центра тяжести (m_x, m_y) . Направление его большой оси определяется углом θ . На рисунке показано расположение большой оси эллипса в координатах XOY и в координатах $X'OY'$ при повороте на угол θ .

Рис. 2. Эллипс рассеивания

Тангенс угла θ рассчитывается по формуле:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\rho\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}, \quad (6)$$

где ρ , σ_x , σ_y – коэффициент корреляции и средние квадратические отклонения рассматриваемого распределения, соответственно.

Двумерное нормальное распределение случайных величин X и Y полностью определяется двумя моментами:

$$m_x = \sum_i \sum_j p_{i,j} x_i, \quad m_y = \sum_i \sum_j p_{i,j} y_j \quad (7)$$

$$\sigma_x^2 = \sum_i \sum_j p_{i,j} x_i^2 - m_x^2, \quad \sigma_y^2 = \sum_i \sum_j p_{i,j} y_j^2 - m_y^2, \quad (8)$$

$$\rho = \frac{\mu_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (9)$$

где m_x, m_y – средние значения или центр тяжести распределенной в плоскости массы; σ_x, σ_y – дисперсии случайных величин X и Y (σ_x^2 и σ_y^2 можно интерпретировать как моменты инерции распределенной массы относительно осей, проходящих через центр тяжести); $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$; ρ – коэффициент корреляции X и Y , μ – смешанный момент:

$$\mu = \sum_i \sum_j p_{i,j} x_i y_j - m_x m_y, \quad (10)$$

где $p_{i,j}$ – веса, которые рассчитываются по формуле:

$$p_{ij} = \frac{(H_o - H_{ij}) \cos \varphi_i}{\sum_i \sum_j (H_o - H_{ij}) \cos \varphi_i} \quad (11)$$

Эквивалентным является единичный эллипс рассеивания, его каноническое уравнение имеет вид:

$$\frac{x^2}{\sigma_u^2} + \frac{y^2}{\sigma_v^2} = 1, \quad (12)$$

где σ_u , σ_v – его полуоси эллипса. Они являются главными средними квадратическими отклонениями, характеризующими рассеивание вдоль осей U и V системы координат UO'V, которая получена путем поворота системы координат XOY на угол θ и параллельного переноса начала координат в точку $O'(m_x, m_y)$. Они определяются по формулам:

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{2} \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\rho^2 \sigma_x^2 \sigma_y^2} \right], \quad (13)$$

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{2} \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\rho^2 \sigma_x^2 \sigma_y^2} \right]. \quad (14)$$

Дополнительной геометрической характеристикой циркуляционного вихря является коэффициент сжатия эллипса **K**, рассчитываемый как отношение:

$$K = \sigma_u / \sigma_v. \quad (15)$$

Угол наклона главной оси эллипса θ и коэффициент сжатия **K** характеризуют ориентацию вихря над поверхностью Земли.

Таким образом, каждое индивидуальное поле представляется набором числовых характеристик ЦПВ, которые в комплексе отражают особенности циркуляции над полушарием.

Расчет описанных параметров циркумполярного вихря производился по специально разработанным программам. В качестве ограничивающей изогипсы H_0 принималась постоянная изогипса характерная для января месяца, совпадающая с осью ПВФЗ для данного естественного синоптического сезона, предложенная Храбровым Ю.В. в работе [9].

Всего в работе рассчитано 14 параметров (L_j). Для каждого из них получены многолетние ряды. Предложенный комплекс структурных особенностей позволяет, в определенной степени, учесть геометрию циркумполярного вихря и особенности его расположения на полушарии. В данной работе, используя

перечисленные выше параметры, проведено исследование по оценке их влияния на температурный режим в различных регионах северного полушария.

Первые попытки анализа и некоторой модификации в определении параметров циркумполярного вихря были проведены в работе [10]. В дальнейшем, степень влияния отдельных составляющих в синхронные сроки выявлялась в работе [11].

Целью данного исследования является оценка вклада каждого из параметров циркумполярного вихря в формирование температуры воздуха в различных регионах северного полушария и оценка возможности использования их в прогностических целях, а также выявление максимальной заблаговременности фонового прогноза среднемесячной температуры воздуха.

В качестве исходных данных для расчета перечисленных характеристик использовались среднемесячные значения геопотенциала на поверхности 500 гПа в период с 1958 по 2011 годы, отнесенные к холодному периоду года (январь). Информационной базой служили данные реанализа в узлах регулярной сетки с шагом $2,5 \times 2,5^\circ$ вдоль широтных кругов и меридианов северного полушария.

Вся территория северного полушария, ограниченная с юга 35° с.ш. была разделена на 30-градусные сектора, вдоль соответствующих меридианов, начиная с нулевого. Всего выделено 12 секторов, которые, в достаточной мере могут соответствовать физико-географическому районированию и индивидуальным климатическим особенностям отдельных регионов.

С целью выявления вклада каждого из рассчитанных параметров в формирование термического режима, между рассчитанными параметрами циркумполярного вихря L_j и средними значениями температуры воздуха $\bar{T}_{ki}^q$ в каждом из выше установленных 12 секторов находилась линейная корреляционная связь.

Для данной длины выборки при 95% доверительном интервале, значимой является величина коэффициента корреляции r , превышающая 0,23. На основании выборочных коэффициентов корреляции для каждого рассматриваемого сектора выбрана оптимальная совокупность предикторов и рассчитаны множественные коэффициенты корреляции, указывающие на возможность использования их в корреляционном анализе.

На первом этапе анализ проводился в диагностическом плане. Отобранная совокупность информативных предикторов для каждого сектора и величина их множественных коэффициентов корреляции представлены в таблице 1.

В таблице, помимо установленных секторов, в двух последних строках приводятся результаты исследования по отбору оптимальной совокупности предикторов, отдельно для всей территории северного полушария и по усеченному сектору, ограниченному широтой 35° с.ш.

Анализ таблицы показывает, что, практически для всех рассматриваемых секторов основными предсказателями являются координаты и местоположение центра циркуляции (X_c , Y_c , φ , λ). Особенно четко это проявляется над Евроазиатским континентом. Исключение составляют сектора 6 – 7, для которых

главную роль играют параметры M , K , Z , описывающие площадные характеристики.

Для западного полушария характерны сочетания параметров, описывающих географическое положение циркуляции и площадные характеристики. К ним, в качестве дополнительных предикторов, включены параметры, описывающие рассеивание вдоль различных осей эллипса циклонического вихря (σ_x , σ_y , σ_u). Что касается степени влияния структурных особенностей циркуляционного вихря на температуру воздуха, как всей территории северного полушария, так и ее усеченной части, то важными показателями оказались масса вихря M и ее интенсивность Z , а также концентрация массы вдоль главной оси эллипса – параметр σ_x .

Таблица 1. Оптимальный набор предикторов для каждого сектора и коэффициенты множественной корреляции (синхронные сроки ($\tau = 0$))

Сектор	Используемые параметры циркумполярного вихря											R
1		Y_c								λ		0,54
2		Y_c								λ		0,65
3		Y_c			θ	σ_x	σ_y				φ	0,72
4		Y_c			θ		σ_y				φ	0,61
5		Y_c								λ		0,43
6			M	Z			σ_y	σ_u	K			0,78
7			M	Z				σ_u	K			0,73
8	X_c	Y_c				σ_x				λ		0,60
9						σ_x	σ_y					0,48
10	X_c	Y_c	M	Z						λ		0,46
11	X_c	Y_c	M	Z						λ	φ	0,44
12		Y_c										0,26
Полушарие			M	Z		σ_x						0,60
Усеченный сектор			M			σ_x						0,50

Исходя из вида таблицы, можно также сделать вывод, что наиболее высокие связи отмечаются для шестого и седьмого секторов, которые находятся в непосредственной близости от климатического расположения центра циркуляции. Их величина достигает значений 0,78 и 0,73 соответственно. Достаточно высокие уровни связи отмечаются для восточной части Европы и Западной Сибири (0,65 и 0,72 соответственно). Ниже всего уровень корреляционной связи отмечается для восточной части Северной Атлантики.

На основании отобранных предикторов построены прогностические линейные уравнения регрессии, в синхронные сроки ($\tau = 0$). Их вид и ошибки представлены в таблице 2.

Таблица 2. Линейные уравнения регрессии и их ошибки ($\tau = 0$)

Сектор	Вид уравнения ($\tau = 0$)	$ \delta $	Q	ρ
1	$Y_1^t = -0.005y_c - 0.005\lambda - 4.2$	1,28	0,78	0,45
2	$Y_2^t = -0.005y_c - 0.007\lambda - 9.6$	1,55	0,81	0,53
3	$Y_3^t = -0.026y_c - 0.01\theta + 0.01\sigma_x - 0.003\sigma_y + 0.3\varphi - 48.2$	1,34	0,85	0,51
4	$Y_4^t = -0.003y_c - 0.02\theta - 0.004\sigma_y + 0.13\varphi - 21.06$	1,41	0,36	0,78
5	$Y_5^t = -0.0035y_c - 0.0043\lambda - 19.37$	1,15	1,08	0,11
6	$Y_6^t = -2.10M - 0.1z - 0.0006\sigma_y + 0.003\sigma_u - 2.35k - 12.64$	0,81	0,45	0,67
7	$Y_7^t = -16.14M + 0.85z + 0.01\sigma_u + 6.61k - 35.47$	1,05	0,56	0,54
8	$Y_8^t = 0.001x_c + 0.004y_c + 0.009\sigma_x + 0.002\lambda - 28.08$	1,67	1,26	-0,2
9	$Y_9^t = 0.006\sigma_x - 0.004\sigma_y - 21.86$	1,76	1,17	0,08
10	$Y_{10}^t = -0.01x_c + 0.01y_c - 11.66M + 0.4z - 0.02\lambda - 9.6$	1,65	1,32	0,13
11	$Y_{11}^t = -0.03x_c - 0.01y_c - 12.08M + 0.34z - 0.01\lambda + 0.17\varphi - 13.84$	1,13	1,37	-0,1
12	$Y_{12}^t = -0.002y_c - 3.5$	1,18	1,14	0,01
Полушарие.	$Y_{пол}^t = -9.55M + 0.46z + 0.003\sigma_x - 3.5$	1,93	0,94	0,34
Усеч. сектор	$Y_{тер}^t = -2.82M + 0.003\sigma_x - 16.73$	1,67		
Седнее		1.39		

Успешность прогностических уравнений оценивалась с помощью известных параметров, используемых в долгосрочных прогнозах погоды: параметром Q , оценивающего оправдываемость прогнозов по величине, параметром Фехнера ρ – по знаку и по абсолютной ошибке δ . Прогнозы считаются оправдавшимися, если $Q < 1,0$, а $\rho > 0,3$.

Исходя из оценок успешности прогнозов, представленных в таблице, следует признать, что в среднем, они не выходят за пределы критериальных величин и поэтому их можно считать успешными. Хотя для различных регионов их величина не одинакова. Наиболее успешными оказались прогнозы для Евроазиатской территории и особенно для 4 сектора (запад Восточной Сибири). Достаточно высокими являются оценки и для Европы. Неудачными оказались прогнозы для океанов.

Таким образом, использование параметров циркуляции, описывающих структуру циркумполярного вихря, в качестве предикторов, для прогноза среднемесячной температуры воздуха, позволяет в синхронные сроки более успешно, по сравнению с климатом, разрабатывать фоновый прогноз.

С целью увеличения заблаговременности прогнозов производились расчеты взаимно-корреляционных функций и расчет уравнений регрессии со сдвигом τ в один и два месяца, то есть оценивалась возможность фонового прогноза температуры воздуха на февраль и март.

Рассчитанные уравнения регрессии и их абсолютные ошибки со сдвигом в один месяц (прогноз на февраль), представлены в таблице 3.

Таблица 3. Уравнения регрессии и их ошибки ($\tau = 1$)

Сектор	Вид уравнения ($\tau = 1$)	$ \delta $
1	$Y_1^t = -0,001x_c - 0,001y_c + 0,34\varphi - 34,29$	1,49
2	$Y_2^t = -0,003x_c - 0,003y_c - 0,006\sigma_y + 0,012\lambda + 0,36\varphi - 33,82$	1,44
3	$Y_3^t = -0,002y_c - 0,007\sigma_y + 0,18\varphi - 15,59$	1,71
4	$Y_4^t = -0,001y_c - 0,0062\sigma_y + 0,22\varphi - 23,3$	2,03
5	$Y_5^t = -0,004x_c - 0,002y_c - 0,003\sigma_y + 0,63\varphi - 69,2$	1,39
6	$Y_6^t = -0,001x_c - 0,15s - 0,002tg\theta - 0,025\theta + 0,27\varphi - 27,5$	2,22
7	$Y_7^t = -0,29S + 7,56$	1,51
8	$Y_8^t = -0,2s + 1,66$	1,85
9	---	—
10	$Y_{10}^t = -0,018\sigma_v + 10,92$	2,94
11	$Y_{11}^t = -12,04 + 0,42z - 2,32$	1,28
12	$Y_{12}^t = -0,015\theta + 0,002\sigma_x - 8,45$	1,61
Полушарие.	$Y_{пол}^t = -0,01\theta - 0,15s - 0,002\sigma_y + 0,57$	1,18
Усеч. сектор	$Y_{тер}^t = -0,001y_c - 0,045s - 0,002\sigma_y - 0,0014\sigma_v + 0,02\varphi + 7,75$	0,66
Седнее		1,58

Из таблицы следует, что оправдываемость прогнозов несколько ухудшилась, средняя ошибка прогнозов составляет 1,6° С. Наиболее успешными, оказались прогнозы, которые рассчитаны для атлантико-европейского сектора. Наименее успешными являются прогнозы для 4, 6 и 10 секторов, в которых средняя ошибка превышает 2° С. Хотя успешность прогноза для данного сдвига ниже, получаемые оценки прогноза могут являться полезными при предварительном планировании различных мероприятий на данный календарный месяц.

Попытка дальнейшего увеличения заблаговременности прогноза температуры воздуха по установленным секторам со сдвигом в два месяца ($\tau = 2$) оказалась не успешной, так как ошибки разработанного метода прогноза оказались значительно большими, чем ошибки климатического прогноза, средняя ошибка по территории составила 10,2 °С.

Таким образом, использование структурных особенностей циркумполярного вихря для прогноза температуры воздуха может быть достаточно успешным с заблаговременностью не выше одного месяца.

Список используемых источников:

1. Кац А.Л. Количественная оценка составляющих общей циркуляции атмосферы в Северном полушарии // Метеорология и гидрология. 1955. № 2. С. 12–17.
2. Крыжов В.Н. Связь среднегодовой температуры воздуха в Северо-Западной Евразии с арктическим колебанием. Метеорология и гидрология. 2004. №1. С. 5–13.

3. Полонский А.Б., Башарин Д.В. О влиянии североатлантического и южного колебаний на изменчивость температуры воздуха в Европейско-Среднеморском регионе // Известия РАН. Физика Атмосферы и океана, 2002. Т. 38. №1. С. 135–145.
4. Данилов Д.Л., Жиглявский А.А. Главные компоненты временных рядов: Метод Гусеница. СПб: С.-Петербургский университет, 2007. 308 с.
5. Вильфанд Р.М. Расчет главных компонент сезонных полей температуры по информативным точкам. Труды ГМЦ. 1991. Вып. 311. С. 78–81.
6. Груза Г.В., Ранькова Э.Л., Семенюк Е.А. Связь индексов атмосферной циркуляции с приземной температурой северного полушария // Метеорология и гидрология, 1990. № 6. С. 21–28.
7. Багров Н.А. О центре циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология. 1975. № 2. С. 15–19.
8. Багров Н.А., Орлова И.И. К вопросу определения центра циркуляции. Л.: Гидрометеиздат, Труды ГМЦ, 1978. Вып. 211. С. 3–11.
9. Храбров Ю.Б. Основные черты развития синоптических процессов в естественных синоптических периодах // Труды ЦИП. 1957. Вып. 63. С. 46–61.
10. Шипко Ю.В., Задорожная Т.Н. Моделирование атмосферной циркуляции северного полушария с оперативным определением краевой изогипсы // Информатика: проблемы, методология. Воронеж: ВГУ, 2011. С. 297–301.
11. Задорожная Т.Н., Закусилов В.П., Семенов Е.К. Оценка влияния характеристик циркумполярного вихря на температуру воздуха в отдельных регионах // Вестник Военного авиационного инженерного университета. 2012. № 2. С. 63–70.

© 2015, Задорожная Т.Н., Закусилов В.П.
Оценка заблаговременности прогноза
среднемесячной температуры воздуха на основе
использования параметров циркумполярного вихря

© 2015, Zadorozhnaja T.N., Zakusilov V.P.
Evaluation of lead time mean monthly air
temperature on the basis of the parameters of the
circumpolar vortex