

## ОЦЕНКА УСПЕШНОСТИ ПРОГНОЗА КОЛЕБАНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИПОЛЮСНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ НЕГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ

Л. М. Акимов, Т. Н. Задорожная

Воронежский государственный университет, Россия  
Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия  
им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Россия

Поступила в редакцию 10 июля 2014 г.

**Аннотация:** В статье обсуждается вопрос о возможности использования информации о неравномерной скорости вращения Земли для прогноза интенсивности циркумполярного вихря, рассчитанного на различных изобарических поверхностях и широтных зонах.

**Ключевые слова:** вращение Земли, интенсивность циркумполярного вихря, изобарическая поверхность, широта, корреляционные связи, уравнения регрессии, ошибки.

**Abstract:** The article discusses the potential for use of information about the irregular speed of the Earth's rotation in order to predict the intensity of the circumpolar vortex, calculated at different isobaric surfaces and latitudinal zones.

**Key words:** Earth's rotation, the intensity of the circumpolar vortex, isobaric surface, latitude, correlation, regression equations, errors.

Трудности в прогнозировании месячных и сезонных аномалий температуры, особенно их экстремальных отклонений от нормы, обусловлены недостаточной изученностью ведущих закономерностей общей циркуляции атмосферы (ОЦА) и причин ее формирования. Не решен вопрос о влиянии геодинамических и геокосмических факторов на атмосферные процессы и через них на погоду.

С целью создания основ для правильного понимания закономерностей общей циркуляции атмосферы Усмановым Р. Ф. в 1947 году была предложена гипотеза о возможных причинах формирования максимумов и других центров действия атмосферы, в основу которых положен учет негеострофических отклонений фактического ветра.

В поисках сил, вызывающих негеострофические отклонения, он обратил внимание на деформационные силы сжатия, возникающие на эллипсоидах вращения как результат преобладания массы на экваториальных широтах и ее дефицит в полярных областях, то есть, за счет отклонения эллипсоида вращения от формы шара. Первые сообщения об этом явлении находятся в работе Л. С. Лейбензона [6], более обстоятельно они разработаны в [5].

© Акимов Л. М., Задорожная Т. Н., 2015

При этом установлено, что чем больше скорость вращения, тем эллипсоид вращения становится более сплюснутым, экваториальный радиус удлиняется, полярный – сокращается. Это означает, что жидкая или газообразная масса при ускорении вращения заметно смещается в сторону экватора, при замедлении, наоборот, она стекает от экваториальных широт к высоким, соответственно перераспределяясь по полушариям, меняя соответствующим образом барический рельеф.

Скорость вращения Земли подвержена как периодическим, так и непериодическим колебаниям. При ее изменении, в каждой точке пространства создается ускорение деформационных сил сжатия, действующих на плоскости параллелей в зональном (долготном) направлении. Кроме того, на плоскости меридианов создаются также тангенциальные и нормальные составляющие. Этот процесс вызывает зональные перемещения масс и соответственно определяет индивидуальную величину прилива газовой и жидкой среды в каждой точке пространства [11].

Вот почему на основании данных о неравномерном вращении Земли появляется возможность прогнозировать колебания интенсивности планетарной циркуляции атмосферы и решать некото-

рые гидрометеорологические задачи, так как скорость вращения Земли в настоящее время рассчитывается заранее.

Вопрос о влиянии вращения Земли на общую циркуляцию атмосферы впервые был поставлен Броуновым еще в 1910 году [4], который объяснил изменения климата и причины ледниковых эпох.

Впервые скорость вращения Земли для разработки прогнозов погоды использовалась в работах Сидоренкова Н. С. [8, 9, 10], в которых была показана возможность прогноза температуры воздуха с различной заблаговременностью.

В данной статье мы предлагаем оценить влияние скорости вращения Земли на общую циркуляцию атмосферы, представленную геопотенциалом  $H$  на изобарической поверхности 1000 гПа и интенсивностью циркумполярного вихря на различных барических уровнях и широтных зонах.

Для решения поставленной задачи на первом этапе оценивалась связь между межмесячными изменениями скорости вращения Земли  $dn$  и межмесячными значениями геопотенциала  $dH_j^{1000}$  в различных узлах географической сетки с шагом  $10 \times 10^\circ$ . Исследования проводились для широты  $50^\circ$  с.ш., описывающей в большинстве случаев местоположение планетарной высотной фронтальной зоны в северном полушарии.

Временные ряды межмесячных изменений геопотенциала  $dH_{j=50}^{1000}$  на широте  $j = 50^\circ$  с.ш. и угловой скорости вращения Земли представлены в виде скользящих разностей рядом стоящих месяцев  $m$ :

$$\begin{cases} dH_{j=50, l=100}^{1000}(m) = H_{m+1}^{1000} - H_m^{1000}, \\ dn(m) = n(m+1) - n(m) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $m$  – порядковый номер элемента разности в выборке ( $m = 1, 2, \dots, 480$ ).

Для примера, на рисунке представлен визуальный вид взаимосвязей межмесячного изменения момента импульса Земли  $dv(m)$  и межмесячных изменений геопотенциала в узле  $j = 50^\circ$  с.ш.  $l = 100^\circ$  в.д.

Основанием для отбора узла с координатой  $l = 100^\circ$  в.д. послужил тот факт, что в данном районе имеет место климатический центр одного из центров действия атмосферы – сибирского максимума. Анализ данного рисунка подтвердил предположение о том, что скорость вращения Земли способна существенно повлиять на формирование одного из объектов общей циркуляции атмосферы – сибирского центра действия атмосферы. Связь между рассматриваемыми параметрами оказалась довольно высокой. На протяжении всего отрезка времени имеет место синхронизация, как в ходе кривых, так и в тенденции одноименного знака скорости вращения Земли и величины геопотенциала. Различие наблюдается лишь в амплитуде колебаний. Коэффициент парной корреляции для данного случая составил 0,78. Это свидетельствует о том, что угловая скорость вращения Земли является реальным фактором, влияющим на интенсивность циркуляции атмосферы в северном полушарии, и, в частности, сибирского максиму-

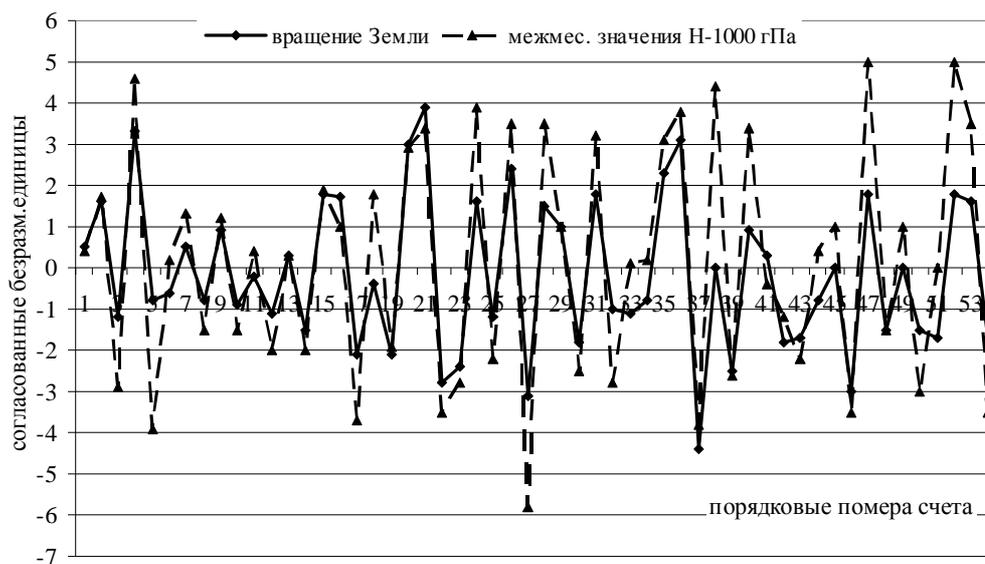


Рис. Временной ход  $dH_{j=50, l=100}^{1000}(m)$  и  $dv(m)$

ма, что хорошо согласуется с теорией, выдвинутой Усмановым Р. Ф. [11] и другие.

Таким образом, используя значения угловой скорости вращения Земли в выявленных наиболее информативных точках северного полушария, можно достаточно успешно предсказать поведение среднемесячного значения геопотенциала на конкретной изобарической поверхности.

В дальнейшем мы предприняли попытку оценить влияние скорости вращения Земли не на отдельные участки земной поверхности, а на интенсивность циркумполярного вихря  $W$  [1, 2, 3, 6].

Полюс циркуляции, как геометрический центр преобладающего переноса воздушных масс в северном полушарии, является одним из факторов динамики макромасштабных циркуляционных систем полушария. Поэтому его интенсивность определяет энергетический потенциал высотной фронтальной зоны и соответственно активность перемещения метеорологических процессов и характер погодных условий на полушарии.

Нами проведены эксперименты по выявлению корреляционных связей между среднемесячными ускорениями угловой скорости вращения Земли  $dv(m)$ , и интенсивностью циркумполярного вихря  $W^g(m)$ . В эксперименте использовались значения циркумполярного вихря  $W^g(m)$ , вычисленные на различных изобарических поверхностях  $g$  и широтных зонах  $j$ . Выборка по каждой поверхности включала все календарные месяцы, не зависимо от сезона года. В результате, исследуемый ряд включал 480 наблюдений  $m$ .

Угловая скорость вращения Земли представлялась в виде скользящих межмесячных значений  $dv(m)$ , а интенсивность вихря в виде среднемесячных значений  $W^g(m)$ . В этом случае предполагалось, что влияние скорости вращения Земли происходит с некоторым запаздыванием, поэтому корреляционные связи рассчитывались со сдвигом по времени  $t$  до 5 месяцев и прекращались на сдвиге, когда ни на одной из широт значимые связи не наблюдались. Результаты расчета представлены в таблице 1. Следует также отметить, что значимый уровень коэффициента корреляции при данной длине выборки составляет  $R_{знач.} = 0,09$ .

Из анализа таблицы 1 следует, что на поверхности 1000 гПа наиболее тесные положительные связи  $R[dv(m), W^{g=1000}(m+t)] \approx 0,19 \div 0,21$  наблюдаются при сдвиге  $t = 1$  месяц на северных широтах ( $j = 60-80^\circ$  с.ш.). При увеличении сдвига теснота связи уменьшается, но увеличивается радиус охвата значимой территории. Величина коэффициентов корреляции при сдвиге  $t = 2$  месяца колеблется в пределах от 0,14 ( $j = 50^\circ$  с.ш.) до 0,18 на широте  $j = 80^\circ$  с.ш. При дальнейшем увеличении сдвига  $t$  значимые связи на поверхности 1000 гПа отсутствуют.

Связь межмесячных изменений угловой скорости вращения Земли и интенсивности вихря  $W^{g=500}$ , рассчитанного для поверхности АТ-500 гПа, представлена в таблице 2.

Анализ таблицы 2 показывает, что на циркумполярный вихрь, расположенный на поверхнос-

Таблица 1

Связь  $R[dv(m), W^{g=1000}(m+t)]$  при различных сдвигах  $t$

АТ-1000 гПа	80 с.ш.	70 с.ш.	60 с.ш.	50 с.ш.	40 с.ш.
Сдвиг 1 мес.	<b>0,21</b>	<b>0,21</b>	<b>0,19</b>	0,08	0,02
Сдвиг 2 мес.	<b>0,18</b>	<b>0,15</b>	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>	0,06
Сдвиг 3 мес.	0,03	-0,07	-0,01	0,05	0,03

Таблица 2

Связь  $R[dv(m), W^{g=500}(m+t)]$  при различных сдвигах  $t$

АТ-500 гПа	80 с.ш.	70 с.ш.	60 с.ш.	50 с.ш.	40 с.ш.
Сдвиг 1мес.	<b>0,11</b>	<b>0,10</b>	-0,04	<b>-0,20</b>	<b>-0,34</b>
Сдвиг 2мес.	<b>0,14</b>	<b>0,15</b>	<b>0,13</b>	<b>0,09</b>	-0,03
Сдвиг 3мес.	0,06	<b>0,10</b>	<b>0,16</b>	<b>0,26</b>	<b>0,24</b>
Сдвиг 4мес.	-0,05	-0,05	0,02	<b>0,17</b>	<b>0,23</b>
Сдвиг 5мес.	-0,02	-0,01	0,01	0,02	0,06

ти 500 гПа, степень влияния межмесячного изменения скорости вращения Земли находится в зависимости от рассматриваемой широты до четырех месяцев с постепенным смещением значимого влияния, от сдвига к сдвигу, на южные широты ( $j = 50-40^\circ$  с.ш.).

Наиболее высокие связи отмечаются при сдвиге  $t = 1$  месяц. Значимые связи имеют место практически на всех широтах за исключением  $j = 60^\circ$  с.ш. При этом для северных широт знак корреляции положительный, но значения  $R$  немногим превышают уровень значимости ( $R = 0,10 \div 0,11$ ). На южных широтах ( $j = 50-40^\circ$  с.ш.) наблюдаются высокие отрицательные корреляционные связи, с экстремумом ( $R = -0,34$ ) на широте  $j = 40^\circ$  с.ш. При  $t = 2$  месяца, теснота связи уменьшается до уровня  $R \approx 0,09 \div 0,15$ . Значимые связи, наблюдаются на широтах  $j = 80-50^\circ$  с.ш., с экстремумом  $R = 0,15$  на широте  $j = 70^\circ$  с.ш.

Значимое влияние угловой скорости вращения Земли на интенсивность приполюсного вихря при  $t = 3$  месяца обнаруживается на всех широтах кроме  $j = 80^\circ$  с.ш. При этом наблюдается увеличение тесноты связей с севера на юг от  $R = 0,10$  на  $j = 70^\circ$  с.ш. до  $R \approx 0,24 \div 0,26$  на широтах  $j = 50-40^\circ$  с.ш.

При сдвиге  $t = 4$  месяца значимые связи  $R[dv(m), W^{g=500}(m+t)]$  отмечаются только на южных широтах ( $j = 50-40^\circ$  с.ш.). Величина уровня связи увеличивается от  $R = 0,17$  на широте  $j = 50^\circ$  с.ш. до  $0,23$  на  $j = 40^\circ$  с.ш. При дальнейшем увеличении сдвига  $t$  значимые связи отсутствуют.

В таблице 3 представлены парные коэффициенты корреляции между межмесячными изменениями угловой скорости вращения Земли  $dv(m)$  и фактическими значениями интенсивности вихря  $W^{g=100}$  на поверхности АТ-100 гПа.

Из анализа таблицы 3 видно, что для высоты 100 гПа знак корреляционной связи при различных временных сдвигах отрицательный, а значит

согласуется с представлениями о характере влияния скорости вращения Земли, описанное в работе [10]. Следует отметить, что уровень связей для данной поверхности, по сравнению с нижележащими слоями, несколько повысился. Продолжительность периода, в течение которого наблюдаются значимые связи так же, как и на поверхности 500 гПа, составляет 4 месяца. Распределение значимых связей по широтам на поверхности АТ-100 гПа носит избирательный характер. На широтах  $j = 60^\circ$  с.ш. и  $j = 80^\circ$  с.ш. при всех временных сдвигах они отсутствуют.

Наибольшие по сравнению к остальным сдвигам значения уровня связи  $R[dv(m), W^{g=100}(m+t)]$  наблюдаются при сдвиге  $t = 1$  месяц. При этом значение корреляционной связи достигает максимума ( $R \approx -0,30 \div -0,33$ ) на южных широтах ( $j = 50-40^\circ$  с.ш.). С увеличением сдвига на всех широтах наблюдается монотонное понижение уровня связи.

Таким образом, проведенные исследования показали, что угловая скорость вращения Земли способна предопределить интенсивность такого крупного объекта общей циркуляции атмосферы как циркумполярный вихрь. Это дает основание использовать ее в прогностических целях. При этом наиболее эффективно ее влияние проявляется в южных широтах, а в качестве наиболее информативного уровня следует отметить поверхность 100 гПа.

Учитывая наличие значимых коэффициентов корреляции для каждой высоты изобарической поверхности и широтной зоны, построены линейные уравнения регрессии. Успешность прогнозов оценивалась с помощью среднеквадратического отклонения  $S_{ошибки}$ . Анализ показал, что для всех вариантов прогноза  $S_{ошибки} \leq S_{клим.}$ . Это свидетельствует о том, что успешность прогноза интенсивности циркуляции, разрабатываемой на основе данного метода, выше климатических вариаций.

Таблица 3

Связь  $R[dv(m), W^{g=100}(m+t)]$  при различных сдвигах  $t$

АТ-100 гПа	80 с.ш.	70 с.ш.	60 с.ш.	50 с.ш.	40 с.ш.
Сдвиг 1 мес	-0,06	<b>-0,20</b>	<b>-0,10</b>	<b>-0,30</b>	<b>-0,33</b>
Сдвиг 2 мес	-0,06	<b>-0,15</b>	-0,01	<b>-0,20</b>	<b>-0,22</b>
Сдвиг 3 мес	-0,08	<b>-0,13</b>	0,01	<b>-0,14</b>	<b>-0,14</b>
Сдвиг 4 мес	-0,04	<b>-0,12</b>	0,00	<b>-0,09</b>	-0,07
Сдвиг 5 мес	-0,01	-0,01	-0,01	0,04	0,07

Для оценки оправдываемости  $W$  по знаку использовался параметр  $r = \frac{n_+ - n_-}{N}$ , где  $n_+$  – количество прогнозов, в которых знаки фактической и прогностической интенсивности циркумполярного вихря совпали;  $n_-$  – количество несовпадений знаков аномалий;  $N$  – общее количество прогнозов. Напомним, что прогноз считается оправданным если  $r \geq 0,3$ .

Исследуя данный параметр по всем изобарическим поверхностям, был сделан вывод о том, что с высотой успешность прогноза знака увеличивается до 1,0. Наименее успешными являются прогнозы для поверхности 1000 гПа.

Для оценки прогноза  $W$  по величине использовался параметр  $q$ , который рассчитывался по формуле:

$$q = \frac{1}{N} \sum \left[ \frac{(DT_{\phi} - DT_{\text{прогн.}})_i}{s} \right]^2. \quad (2)$$

Прогноз считается оправданным, если  $q \leq 1$ .

Анализ показал, что практически для всех вариантов прогноза  $q \leq 1,0$ , а это соответствует установленным требованиям.

Используя данный подход, можно выбрать наиболее приемлемый вариант прогноза интенсивности циркумполярного вихря, на основании которого произвести расчеты как интенсивности и возмущенности поля геопотенциала в целом, так и в каждой точке отдельно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов Л. М. Оценка геофизических факторов на формирование климатического режима северного полушария / Л. М. Акимов, Т. Н. Задорожная // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2006. – № 1. – С. 5-8.

Акимов Леонид Мусамудинович  
кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (473)266-56-54, 8-951-850-49-82, E-mail: [akl63@bk.ru](mailto:akl63@bk.ru), [deanery@geogr.vsu.ru](mailto:deanery@geogr.vsu.ru)

Задорожная Тамара Николаевна  
кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник 3 научно-исследовательского отдела Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия», г. Воронеж

2. Акимов Л. М. Использование структурных особенностей циркумполярного вихря для прогноза температуры воздуха в отдельных регионах северного полушария / Л. М. Акимов, Т. Н. Задорожная // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2013. – № 1. – С. 67-74.

3. Акимов Л. М. Характеристики вертикальной структуры циркумполярного вихря северного полушария / Л. М. Акимов, Ю. В. Шипко, Т. Н. Задорожная // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2012. – № 1. – С. 89-94.

4. Броунов П. И. Курс физической географии / П. И. Броунов. – Петроград. 1917.

5. Идельсон Н. И. Теория потенциала и ее приложения к вопросам геофизики / Н. И. Идельсон. – Ленинград; Москва : Государственное технико-теоретическое издательство, 1932. – 348 с.

6. Лейбензон Л. С. Деформация упругой сферы в связи с вопросом строения Земли / Л. С. Лейбензон // Собрание трудов АН СССР. – Москва : Издательство АН СССР, 1955. – Т. 4. – С. 186-270.

7. Педь Д. А. Некоторые климатические особенности циркумполярного вихря северного полушария / Д. А. Педь // Труды Гидрометцентра. – Москва, 1973. – Вып. 115. – С. 25-44.

8. Сидоренков Н. С. О среднегодовой зональной циркуляции атмосферы / Н. С. Сидоренков // Метеорология и гидрология. – 1980. – № 8. – С. 30-35.

9. Сидоренков Н. С. Механизм возбуждения Чандлеровского движения полюса / Н. С. Сидоренков // Астрономический журнал. – 1992. – Т. 69, вып. 4. – С. 905-909.

10. Сидоренков Н. С. Некоторые результаты использования данных о неравномерности вращения Земли для изучения атмосферных процессов / Н. С. Сидоренков, П. И. Свиренко, Н. С. Шаповалов // Труды Гидрометцентра. – Москва, 1984. – Вып. 230. – С. 87-97.

11. Усманов Р. Ф. О влиянии вращения Земли на общую циркуляцию атмосферы / Р. Ф. Усманов // Труды Центрального института прогнозов. – Москва : Гидрометеорологическое издательство, 1961. – Вып. 104. – С. 3-40.

Akimov Leonid Musamudinovitch  
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Head of chair of nature management, department of geography, geocology and tourism, Voronezh State University, Voronezh, tel. 8-951-850-49-82, (473) 266-56-54, E-mail: [akl63@bk.ru](mailto:akl63@bk.ru), [deanery@geogr.vsu.ru](mailto:deanery@geogr.vsu.ru)

Zadorozhnaya Tamara Nikolayevna  
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of 3 Research Division of Military Training and Research Centre of the Air Force, «Air Force Academy», Voronezh