

# ДИНАМИКА ЗИМНЕГО ВЫСОКОШИРОТНОГО БЛОКИРУЮЩЕГО АНТИЦИКЛОНА ЗИМОЙ 2012 ГОДА В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

*А.В. Кислов, Е.К. Семенов, Н.Н. Соколихина, К.О. Тудрий*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
avkisllov@mail.ru*

## **Введение**

Аномальные события гидрометеорологического режима (аномальные низкие и высокие температуры, паводки, засухи) связаны с долгоживущими особенностями региональной атмосферной циркуляции. Одним из наиболее ярких примеров являются блокирующие ситуации внетропических широт.

Причины возникновения и механизмы, поддерживающие существование вихрей в квазистатическом состоянии, известны далеко не полно. Описание динамики индивидуального вихря, находящегося в контакте с окружающей его средой, могло бы быть осуществлено с помощью эволюционных уравнений для различных интегральных показателей. Однако в общем виде такие уравнения существуют. Главная проблема комплексного описания вихря состоит в том, что для его описания требуется знать границы вихря в пространстве, необходимые для того, чтобы выполнить интегрирование тех или иных показателей по поверхности, окантовывающей вихрь. Описание деформации формы вихревых образований основано на уравнениях контурной динамики, сформулированных в [9]. Эти уравнения сложны, поэтому был разработан ряд упрощающих подходов, позволивших на аналитическом уровне продвинуться в понимании вихревой динамики. В частности, появились представления о точечных вихрях (здесь свойства вихря

сконцентрированы в некоторой «узкой» зоне, окруженной безвихревой средой) [3]. Другой подход связан с априорным заданием формы вихря в виде эллипсоида, который в процессе эволюции может деформироваться (растягиваться – сжиматься и вращаться), но оставаться эллипсоидом [4].

Применение методов контурной динамики возможно и в гораздо более общем случае, однако уравнения деформации границ оказываются очень сложными и могут быть решены только численно. Это снижает ценность подхода, так как в современных (contourpogy) численных моделях, обладающих высокой степенью детализации, становится возможным воспроизведение самой вихревой структуры. Далее требуется лишь выделить тем или иным способом область, занятую вихрем, и на этой основе перейти к вычислению его интегральных характеристик. Для изучения статистики атмосферных вихрей сравнительно недавно была разработана методика, в которой занимаемая ими область определяется по «последней замкнутой изобаре».

В данной работе был использован иной подход, основанный на аппроксимации вихревой структуры несколькими естественными ортогональными векторами. Анализу подвергается атмосферный вихрь, существующий квазипостоянно в некотором регионе. Поскольку он длительное время не выходит за пределы некоторой области, необходимость в точной диагностике отпадает. Данный метод позволяет не только диагностировать вихри, но и вывести уравнения, раскрывающие механизмы эволюции вихрей. При этом не рассматривается проблема возникновения вихря, т. е. анализируется уже существующий вихрь.

### **Методика анализа блокирующего антициклона как целостного атмосферного объекта**

В данной работе развитая нами методика применяется для исследования ситуации долгоживущего блокирования над западным сектором Арктики зимой 2011/2012 гг., которая была самой теплой в Арктике за всю историю регулярных метеонаблюдений [2]. На Земле Франца-Иосифа в январе впервые была зафиксирована температура выше 0 °С, а значительная часть акваторий Баренцева и

Карского морей оставалась свободной ото льда. Изучение механизмов увеличения зимних температур в западной Арктике может быть ключом к пониманию причин формирования и прогнозированию аномалий погоды как в высоких, так и в средних широтах [2, 5, 7].

Рассмотрим две изобарические поверхности, расположенные одна над другой, на геопотенциальных высотах  $H$  и  $H_1$ . Разность высот представляет собой величину относительного геопотенциала  $h$ . Применив к  $h$  плоский оператор Лапласа и умножив каждое слагаемое на  $g/f$  ( $f$  – параметр Кориолиса), получим

$$\frac{g}{f} \nabla^2 H = \frac{g}{f} \nabla^2 H_1 - \frac{g}{f} \nabla^2 h. \quad (1)$$

В последнем слагаемом заменяем, в соответствии с уравнением статики,  $h = \frac{R\langle T \rangle}{g} \ln \frac{p}{p_1}$ . Дифференцируя каждое слагаемое в (1) по времени, имеем

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial \xi_1}{\partial t} - \frac{R}{f} \ln \frac{p}{p_1} \nabla^2 \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t}. \quad (2)$$

$\langle \rangle$  – символ осреднения по слою. Будем считать, что выражения с индексом «1» относятся к средней тропосфере (изобарическая поверхность 500 Па), а без индекса – к нижней (изобарическая поверхность 925 гПа). В средней тропосфере, где дивергенция существенно меньше, чем выше и ниже в тропосфере (бездивергентный слой), изменение завихренности в рассматриваемом случае связано лишь с ее адвекцией:

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial t} = -\vec{v} \nabla (\xi_1 + f). \quad (3)$$

Чтобы получить выражение для производной  $\frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t}$ , используем уравнение бюджета внутренней энергии:

$$\frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} = A_T - \langle \omega(\gamma_a - \gamma) \rangle + E_T, \quad (4)$$

где  $A_T = -\left\langle \vec{v} \nabla_h T \right\rangle$  – средняя по слою адвекция температуры. Второе слагаемое характеризует вертикальные движения ( $\gamma_a$  – сухоадиабатический градиент температуры,  $\gamma = \frac{\partial T}{\partial z}$ ).  $E_T$  есть приток тепла за счет радиационных процессов, турбулентных мелкомасштабных движений и выделения скрытого тепла [1].

В итоге получаем уравнение

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\vec{v} \nabla (\xi_1 + f) - \frac{R}{f} \ln \frac{p}{p_1} \nabla^2 \{ \langle A_T \rangle - \langle \omega(\gamma_a - \gamma) + E_T \rangle \}, \quad (5)$$

показывающее, что развитие антициклона в нижних слоях тропосферы определяется адвекцией завихренности в вышележащем слое и пространственной конфигурацией адвекции тепла (температуры) и потока явного тепла. Уравнение такого типа было получено в [6].

Будем считать, что конфигурации полей радиационного баланса и явного тепла одинаковы, поэтому  $\nabla^2 \{E_T\}$  определяется величиной потока явного тепла в приповерхностном слое. Это важно в практическом смысле, поскольку потоки явного тепла представлены в данных реанализа.

Для простоты представления материала перепишем (5) в форме

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \Omega + A + B + C, \quad (6)$$

последовательно заменив каждое слагаемое в правой части (5) на соответствующие обозначения.

В  $\frac{\partial \xi}{\partial t}$  заменим  $\xi$  на разложение по ЕОФ и затем умножим обе части уравнения (6) на первый вектор разложения  $V_1(\lambda, \varphi)$ . Сходные математические преобразования предложены в [3] при анализе систем циркуляции атмосферы планетарного масштаба. В силу ортогональности получим следующее обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = \Omega V_1(\lambda, \varphi) + AV_1(\lambda, \varphi) + BV_1(\lambda, \varphi) + CV_1(\lambda, \varphi). \quad (7)$$

Аналогично можно получить уравнение для  $dy_2/dt$ . Отметим, что вектор скорости ветра, входящий в выражение адвекции температуры, связан с завихренностью известным соотношением, получающимся дифференцированием интегрального выражения решения уравнения Пуассона  $\frac{g}{f} \nabla^2 H = \xi$ . Поэтому скорость в каждой точке зависит от деталей распределения завихренности по всей области, занятой вихрем. Однако подстановка выражения для скоростей в (5) превращает его в сложное уравнение, что лишает возможности провести аналитическое исследование. Рассматривая поле скоростей без явной привязки к полю завихренности, мы получаем уравнения для  $y_1$ ,  $y_2$  и др., которые решаются независимо. Они представляют собой искомую модель ситуации, поскольку можно, зная правую часть, рассчитать динамику компонент и вновь собрать поле, используя  $V(\lambda, \varphi)$ .

Данный подход может быть эффективным средством анализа только в том случае, если внутри выбранной области разложение Фурье описывается лишь первыми слагаемыми. В этом случае уравнение (5) заменяется системой нескольких обыкновенных дифференциальных уравнений, в которых векторы  $y_1$ ,  $y_2$  и др. есть интегральные индексы, комплексно характеризующие динамику вихря как целостного образования (левая часть уравнения), а в правой части уравнения сосредоточены факторы, определяющие состояние блокирования. Их вариации, сопоставимые с представленными в правой части физическими факторами, дают представление о механизмах, вызывающих те или иные изменения. Другое ограничение метода связано с априорно выбираемыми границами: результаты должны быть принципиально чувствительны к их изменениям.

Все расчеты (завихренность, разложение аномалий завихренности по ЕОФ, интегральные составляющие вихря) проводились за весь период существования блокирующего антициклона над европейской территорией России (ЕТР) с 18 января по 13 февраля

2012 г. по данным реанализа NCEP/NCAR о меридиональной, зональной и вертикальной составляющих скорости ветра, температуре воздуха, потоках явного тепла.

Предлагаемая методика рассчитана на то, что вихрь должен локализоваться в конечной области, поэтому был выбран период, когда ситуация блокирования была максимальной. По пространству рассматривался район от 22,5 до 97,5° в. д. и от 77,5 до 57,5° с. ш., в котором давление было постоянно повышено.

Данные о времени существования и локализации антициклона были взяты из [2].

### **Обсуждение результатов**

На первом этапе были построены и проанализированы поля разложения по естественным ортогональным функциям аномалий завихренности в нижней тропосфере (изобарическая поверхность H925). Значимыми оказались три первых вектора, в которые вошло 68 % изменчивости (соответственно, 36 % – в первый, 22 % – во второй, 10 % – в третий).

В первый вектор вошла основная причина перестройки атмосферной циркуляции зимой 2012 г. – выдвижение отрога сибирского антициклона на Среднюю и Нижнюю Волгу. Уже к 18–20 января он трансформировался в самостоятельный центр с давлением 1055–1060 гПа. Важно отметить, что по вертикали антициклоническая циркуляция прослеживалась до высоты 6–8 км. Одновременно над северной частью Норвежского моря сформировался глубокий обширный и высокий так называемый центральный циклон, являющийся результатом активной циклонической деятельности над атлантическим сектором Арктики [2]. На карте первого вектора разложения по ЕОФ аномалий завихренности выделяются два замкнутых контура с противоположными знаками значений: отрицательных на северо-западе (это соответствует положению циклона) и положительных (это соответствует положению антициклона) в центре территории (рис. 1 а). Как известно, в результате такой перестройки макромасштабной циркуляции создались самые благоприятные условия для интенсивной адвекции теплого воздуха из Западной Европы и Атлантического океана в центральную область Арктического бассейна [2].

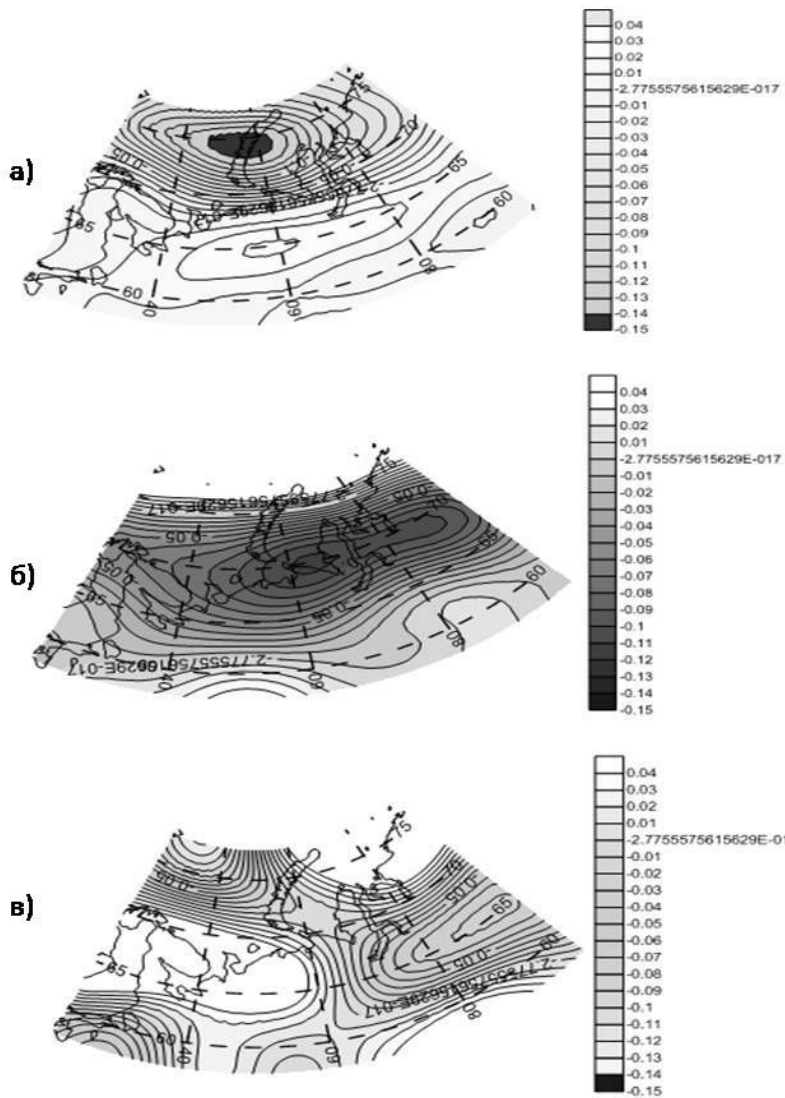


Рис. 1. Пространственное распределение векторов разложения аномалий вихря скорости по EOF: первый (а); второй (б); третий (в) векторы.

Во второй вектор вошли процессы дальнейшего продвижения антициклона на северо-запад ЕТР. Его центр располагался над Сыктывкаром, т. е. приближался к тропосфере субарктического бассейна, оттесняя атлантические циклоны с Норвежского моря значительно севернее. В это время их траектории проходили над Шпицбергом и Землей Франца-Иосифа. В результате в эти высокоширотные районы начинает поступать аномально теплый воздух, а под теплую тропосферу приполярных районов подстраивается поле давления, что усиливает антициклонический эффект.

Область максимальной адвекции холода из континентальной Сибири наблюдается на юге территории, где возникает холодный циклон. Этот процесс отразился в распределении второго вектора аномалий завихренности (рис. 1 б) с четким замкнутым контуром отрицательных в центре и положительными значениями в северной и южной частях территории. Именно эти процессы, как было показано в [2], и привели к тому, что изменилось направление ведущего потока над Заполярьем с западного на южный, что вызвало исключительно мощный вынос тепла в зимнюю Арктику.

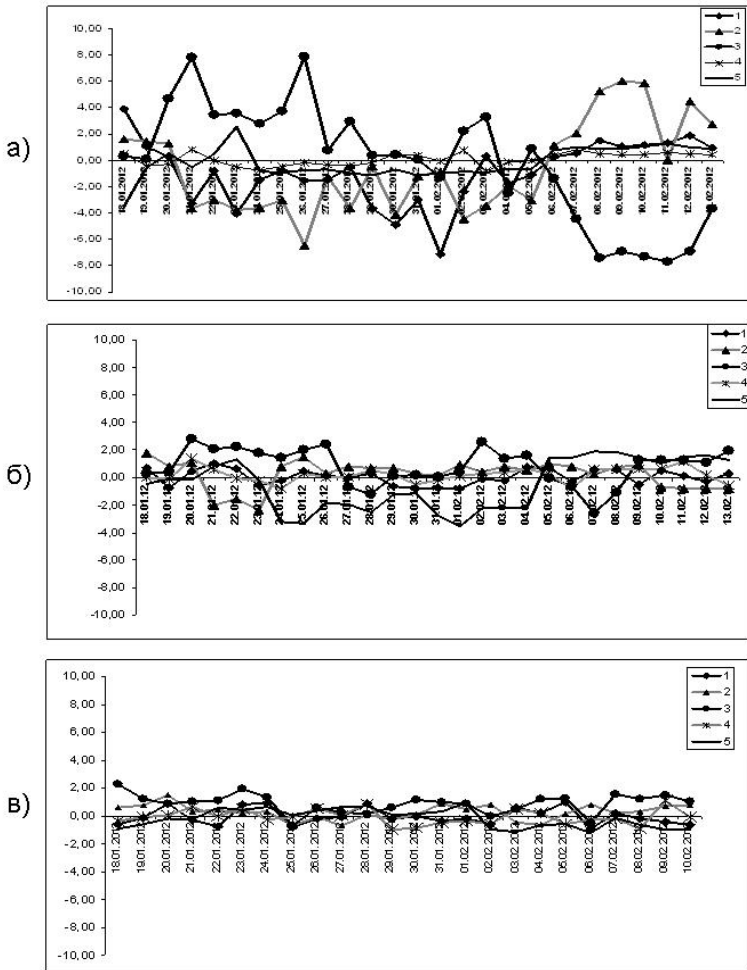
Третий вектор характеризует большую термическую неоднородность барикоциркуляционных возмущений в западном и восточном переносе, связанную с прохождением отдельных гребней и ложбин (рис. 1 в). Южная периферия антициклона оказалась под влиянием холодного континентального воздуха из Сибири, что обусловило формирование циклонической циркуляции. И наоборот, тепло Атлантики приходило в Арктику и способствовало усилению антициклонической циркуляции.

Таким образом, можно предположить, что первый вектор характеризует перестройку крупномасштабной атмосферной циркуляции зимой 2012 г. и начало образования блокирующего антициклона, второй вектор – усиление интенсивности и площади антициклонического вихря в нижней тропосфере за счет выноса аномального тепла в центральную Арктику, а в третий вектор вошли процессы, которые происходили вокруг этого долгоживущего антициклонического образования.

Расчет правой части уравнения (7) (и аналогичных для второго и третьего векторов) способствует пониманию факторов, влияющих на развитие вихря как целостного образования. Для трех



выделенных по разложению ЕОФ процессов эти факторы действуют по-разному (рис. 2).



**Рис. 2. Составляющие вихря для первых трех векторов разложения по ЕОФ ( $c^2 \cdot 10^9$ ): 1 –  $dy_i(t)/dt$ ; 2 – адвекция скорости вихря в средней тропосфере; 3 – адвекция температуры; 4 – вертикальные движения; 5 – потоки явного тепла для первого (а), второго (б), третьего (в) векторов.**

Но есть и общие закономерности, так, фактор вертикальных движений мал для всех случаев, и поэтому можно считать, что он не играет важной роли. Здесь сыграло роль то, что, во-первых, градиенты температуры воздуха не сильно отличаются от сухоадиабатического и, во-вторых, вертикальные скорости малы. Также в целом мала и производная  $\frac{dy_i(t)}{dt}$  ( $i=1, 2, 3$ ), что указывает на то, что факторы в среднем компенсировали друг друга и функционировали так, чтобы не допускать, в частности, развития сверхбольших аномалий.

Ранее в [8] на примере летней блокирующей ситуации (лето 2010 г.) было показано, что главную роль в процессе регенерации субтропического антициклона играет адвекция вихря скорости в средней тропосфере, которая усиливается за 2–3 дня до развития процесса регенерации, что, в свою очередь, через сутки усиливает среднюю по слою температурную адвекцию и потоки явного тепла от поверхности.

На процессы, описываемые первым вектором разложения (рис. 2 а), оказывают основное влияние средняя по слою адвекция температуры и адвекция завихренности в средней тропосфере (второе и первое слагаемые в (7) соответственно). При этом важно отметить, что эти факторы имеют разные знаки. Отрицательная завихренность создается соответствующей адвекцией в средней тропосфере, в то время как адвекция теплого воздуха балансирует этот процесс. Когда началась перестройка атмосферной циркуляции (с 4 февраля), поменялись знаки у этих факторов, что, по-видимому, послужило изменению ситуации и в дальнейшем привело к восстановлению западного переноса.

На процессы, которые описывает второй вектор, так же как и в предыдущем случае, на этапе начала блокирования оказывают влияние первые два фактора и с теми же знаками. Но на втором этапе, начиная с 27 января, когда уже наблюдалась ситуация стабилизации и усиления интенсивности антициклона, влияние этих факторов ослабло, но увеличилось влияние потоков явного тепла (рис. 2 б). Но значения всех факторов по сравнению со значениями факторов, которые оказывают влияние на процессы,

описываемые первым вектором разложения по ЕОФ, почти в два раза меньше.

Значения факторов, выделенных для третьего вектора разложения по ЕОФ, становятся еще меньше (рис. 2 в), особенно это касается первых двух. Можно заключить, что все четыре фактора оказывают равное влияние на изменение  $u_3$ . А с другой стороны, это можно объяснить и тем, что, как уже говорилось выше, предлагаемая методика рассчитана для стационарного вихря, а третий вектор ЕОФ описывает большую термическую неоднородность барикоциркуляционных возмущений в западном и восточном переносе, связанную с прохождением отдельных гребней и ложбин.

### Заключение

В работе на примере блокирующей ситуации над ЕТР зимой 2012 г. опробована методика, предложенная в [8], позволяющая оценивать эволюцию вихря как целостного образования. Применение ее эффективно в случае вихря, стабильно существующего на некоторой территории. В этом случае возможно количественное получение факторов, определяющих его динамику.

Было показано, что в процессе усиления антициклона главную роль играла адвекция вихря скорости в средней тропосфере. Когда же произошла интенсификация антициклона, усилившаяся средняя по слою температурная адвекция сдерживала его развитие.

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-05-00509.

### Список использованных источников

1. Кислов А.В. Климатология. – М.: Академия, 2011. – 224 с.
2. Семенов Е.К., Соколихина Н.Н., Тудрий К.О., Щенин М.В. Синоптические механизмы зимнего потепления в Арктике // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 9. – С. 20–30.
3. Сэффмэн Ф. Динамика вихрей. – М.: Научный мир, 2000. – 376 с.
4. *Cushman-Rosin B., Hell W.H., Nof D.* Oscillation and rotation of elliptical warm-core rings // *J. Geophys. Res.* – 1985. – Vol. 90. – P. 11756–11764.
5. *Overland J.E., Dethloff K., Francis J.A., Hall R.J., Hanna E., Kim S.-J., Shepherd T.G., Vihma T.* Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic // *Nature Climate Change.* – 2016. – Vol. 6. – P. 992–999.

6. *Petterssen S.* Weather Analysis and Forecasting. – New York: McGraw-Hill, 1956.

7. *Semenov V.A., Latif M.* Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 // *Environ. Res. Lett.* – 2015. – Vol. 10, No. 5. – P. 054020.

8. *Tudriy K.O., Kislov A.V., Sokolikhina N.N., Semenov E.K., Tudriy V.D.* The circulation features of catastrophically hot weather formation in Moscow during summer 2010 // *International Geographical Union (IGU) Regional Conference 2015, Москва, Россия, 17–21 августа 2015 г.*

9. *Zabusky N.J., Hughes M.N., Roberts K.V.J.* Contour dynamics for the Euler equations in two-dimensions // *J. Comp.Phys.* – 1979. – Vol. 30, No. 1. – P. 96–106.

*Поступила в редакцию 08.02.2017 г.*