

# ЭВОЛЮЦИЯ ГРУППЫ ЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

*А.Э. Похил*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации  
pokhil@mecon.ru*

## **Введение**

Изменчивость погоды на Земле связана с образованием, эволюцией, взаимодействием друг с другом течений и вихревых систем в атмосфере. Настоящей "кузницей" вихревых систем – циклонов – является Антарктида. При наблюдении за динамикой цепочек циклонов (по спутниковым снимкам), как бы стекающих с Антарктиды, видно, что эти вихри взаимодействуют между собой: догоняют, сливаются, удаляются, энергетически подкачивают, усиливают и ослабляют друг друга.

В первом приближении можно принять, что основной массив оледенения Антарктиды расположен симметрично относительно оси вращения Земли и окружен кольцом вод, простирающихся на 1000 км к северу. Такое симметричное расположение приводит к определенной симметрии движения воздушных потоков над Антарктидой [4].

При сравнении полей давления над Арктикой и Антарктидой хорошо видно, что структура полей над Арктикой значительно более сложная. Эта сложность обязана, в частности, влиянию близко расположенных материков. Положение Антарктиды среди открытого океана, удаленность от других материков, сделали ее естественным местом для "чистого природного эксперимента".

На физических и численных моделях успешно воспроизводится ряд явлений, исследуемых в геофизической гидродинамике. С помощью моделей можно оценить, какие параметры и характеристики вихрей и окружающей среды влияют на поведение и вид их взаимодействия. Традиционным направлением исследования важнейших закономерностей взаимодействия вихрей является рассмотрение точечных вихрей [1, 2, 3]. В точечном вихре завихренность сосредоточена в отдельных точках. Всюду, кроме этих точек, она равна нулю. Кроме того, точечный вихрь

имеет бесконечную кинетическую энергию. Постановкой задачи динамики точечных вихрей на сфере начали заниматься уже в XIX веке. Важную роль точечные вихри играют в динамической метеорологии. Но атмосферные вихри – это распределенные вихри, т. е. вихри, в которых начальное поле ветра представляется осесимметричным распределением его тангенциального компонента. Ряд работ [6–9] посвящен исследованию на численных моделях возможных вариантов эволюции групп распределенных (синоптических) вихрей в атмосфере. В [8] исследовался особый случай поведения группы вихрей во вращающемся поле: рассматривалась динамика вихрей, обнаруженных в глазе тайфуна Изабель.

### **Постановка эксперимента и результаты исследований**

Все атмосферные процессы, в частности вихревые системы (спиральные течения: циклоны, антициклоны, тайфуны, смерчи, торнадо), развиваются и проходят цикл эволюции во вращающейся системе Земли. Для многих задач динамики атмосферы более существенна угловая скорость вращения Земли, нежели искривленность ее поверхности [2]. В настоящей работе с помощью численной модели [5] исследуется эволюция ансамбля распределенных вихрей во вращающемся поле.

Аналогом таких групп вихрей во вращающемся поле, как уже говорилось выше, являются системы вихрей, организующихся вокруг Антарктиды.

### ***Эксперименты по взаимодействию вихрей в однородном поле***

Рассмотрим поведение пары одинаковых взаимодействующих вихрей, помещенных в однородное поле.

Начальное поле ветра в циклоническом вихре представлялось осесимметричным распределением  $v(r)$  его тангенциального компонента [5]:

$$v(r) = V (d/R) \cdot \exp[(1/b) \times (1 - (d/R)^b)], \quad (1)$$

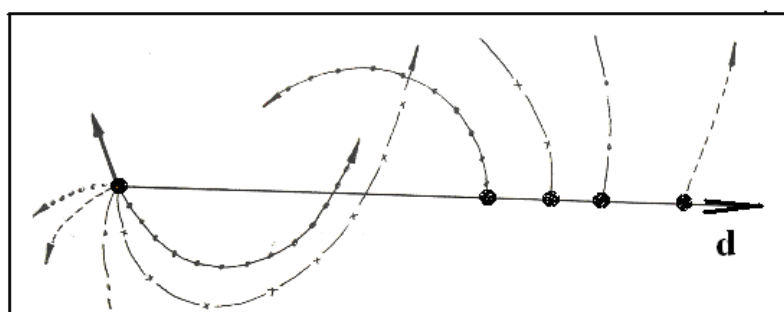
где  $R$  – радиус максимальных ветров, км;  $V$  – скорость на радиусе максимальных ветров, м/с;  $r$  – расстояние от центра вихря, км;  $d$  – расстояние между центрами вихрей, км;  $b$  – показатель, определяющий степень уменьшения тангенциальной составляющей скорости ветра вдоль радиуса.

В экспериментах рассматриваются вихри, имеющие  $b=2$ . Такие вихри наиболее устойчивы, и в процессе эксперимента не происходит их обрушения (разрушения). Поведение и устойчивость вихрей с показателем  $b=3-0,3$  было предметом изучения в предыдущих работах автора [7, 8].

В настоящей работе представлены результаты исследования поведения вихрей в зависимости от

- расстояния между центрами вихрей;
- характеристик вихрей: радиуса максимальных ветров, мощности вихрей (скорости на радиусе максимальных ветров).

Изменение первоначального расстояния между центрами вихрей приводит к различному поведению вихрей и, соответственно, существенному отличию траекторий (рис. 1).



**Рис. 1.** Траектории центров пары одинаковых взаимодействующих вихрей в однородном поле при различных расстояниях между центрами вихрей (черными кружками обозначены начальные положения центров вихрей).

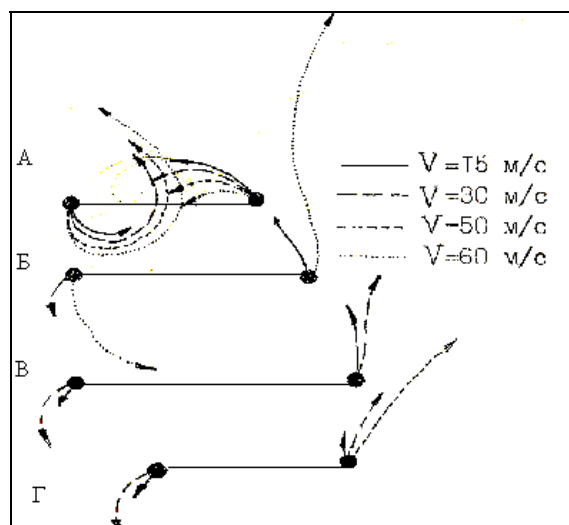
Исследование поведения пары одинаковых распределенных вихрей в однородном поле показало, что вид взаимодействия (стягивание или расталкивание), а также вид траекторий (длина и кривизна) зависит от характеристик вихрей и расположения их центров (рис. 1, 2). Для данного распределения скоростей ветра (1) найдено критическое соотношение  $d/2R=2,7$ , при котором вихри ведут себя относительно стабильно: не сближаются и не расталкиваются. Получено также, что более мощные вихри перемещаются с большими скоростями (рис. 2). На рисунке представлено влияние скорости ветра  $V$  на радиусе максимальных ветров  $R$  на взаимодействие вихрей при разных расстояниях между ними:

$R = 300$  км,  $d=660$  км,  $d/2R=2,2$ ;

$R = 300$  км,  $d=810$  км,  $d/2R=2,7$ ;

$R = 300$  км,  $d=960$  км,  $d/2R=3,2$ ;

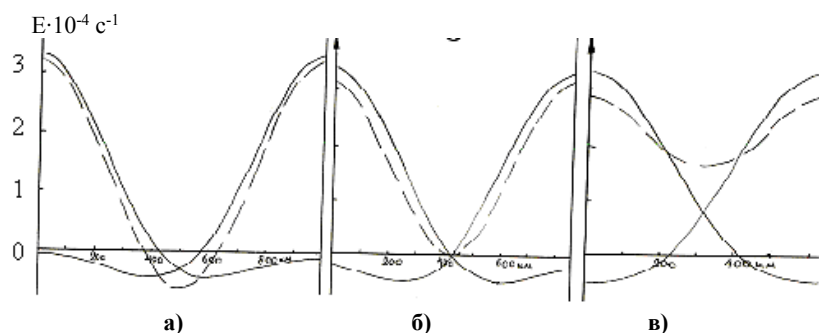
$R = 180$  км,  $d=660$  км,  $d/2R=3,7$ .



**Рис. 2.** Траектории вихрей, имеющих различные скорости на радиусе максимальных ветров от 15 до 60 м/с. В экспериментах (а) – (г) центры вихрей расположены на разных расстояниях (черными кружками обозначены начальные положения центров вихрей).

Объяснение поведению вихрей дает представленная на рис. 3 картина завихренности каждого из двух вихрей и их суммарной завихренности. На рисунке представлены три случая, характеризующие поведение вихрей, расположенных на различных расстояниях: меньших, больших и равных критическому ( $d/2R=2,7$ ). При расстоянии, меньшем критического (рис. 3в), суммарная завихренность между ними имеет положительное значение (т. е. имеет место область пониженного давления), и, естественно, вихри сближаются (притягиваются), вращаясь по циклонической орбите (по закону Фуззивара).

При расстоянии, равном критическому (рис. 3б), между вихрями наблюдается нулевая завихренность. При этом вихри вращаются также по циклоническим орбитам относительно друг друга, но их центры находятся на почти неизменном расстоянии (не сближаясь и не отталкиваясь), либо слабо колеблются относительно друг друга. В этом случае наблюдаются спиралевидные траектории [6]. В третьем случае (рис. 3а) между вихрями расположена область отрицательной завихренности (область повышенного давления), при этом исходные циклонические вихри отталкиваются.



**Рис. 3.** Завихренности пары одинаковых вихрей (непрерывные кривые) и суммарная завихренность (пунктир):  $R=300$  км,  $b=2$ , при начальном расстоянии между центрами вихрей  $d$ , равном 1000 км (а), 810 км (б), 540 км (в).

### *Эксперименты по взаимодействию вихрей во вращающемся поле*

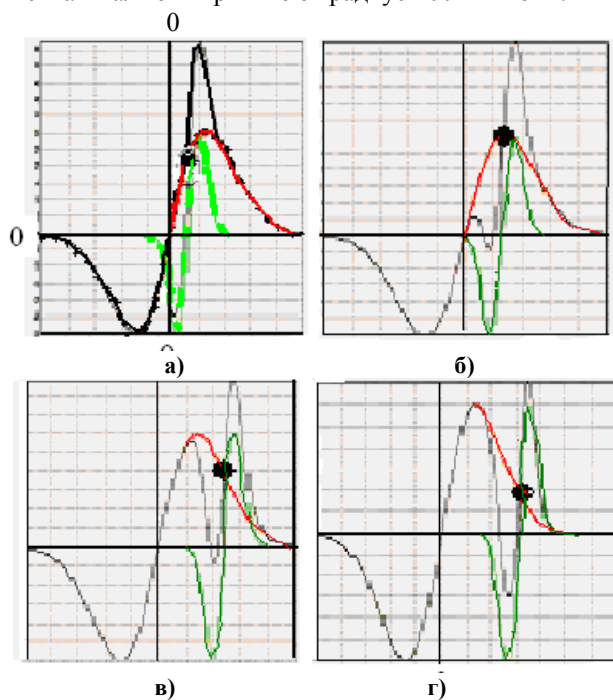
Рассмотрим эволюцию ансамблей распределенных вихрей во вращающемся поле. Вращающееся поле моделировалось большим вихрем (будем называть его "вихрем – полем" с радиусом  $R_b$ ) с центром, расположенным в центре исследуемой системы и занимающим все расчетное поле. «Вихрь – поле» имитирует изменение скорости вращения Земли с широтой.

Рассматривалось изменение поведения вихрей в зависимости от: 1) расстояния между центрами вихрей ( $d$ ) – малого вихря и "вихря – поля"; 2) характеристик вихрей: относительного радиуса максимальных ветров  $R/R_b$ , мощности вихрей в группе (скорости на радиусе максимальных ветров); 3) количества малых вихрей в поле большого вихря.

#### *1 серия. Уединенный вихрь во вращающемся поле*

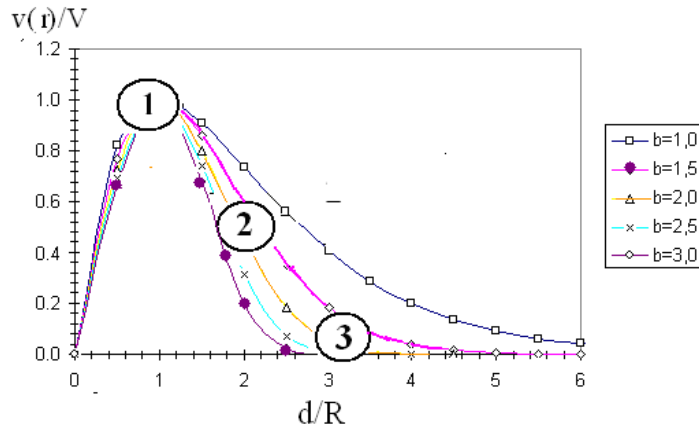
Исследовалось изменение взаимодействия вихрей при изменении исходного расстояния между их центрами. В поле большого вихря подсаживается малый вихрь. Внедряя малый вихрь во вращающееся поле, меняем структуру самого вихря и суммарного поля ветра, поскольку происходит суммирование положительных и отрицательных скоростей обоих вихрей. При положении малого вихря на разных расстояниях от центра "вихря – поля" (рис. 4) скорости и градиенты скоростей в области вихря различны и, соответственно, различны искажения формы вихря и поля. Это меняет вид их взаимодействия и траектории перемещения

центров. На рис. 4 показаны кривые распределения скоростей в большом, малом вихрях и суммарное распределение скоростей пары вихрей. В этих экспериментах малые вихри имеют радиус 200 км и  $b=2$ .



**Рис. 4.** Кривые распределения скоростей пары вихрей: в большом (красная линия), малом (зеленая линия) и суммарное (черная линия). Черной точкой обозначено положение центра малого вихря на кривой скоростей большого вихря: исходное относительное расстояние ( $d/2Rб$ ) принималось равным 0,75 (а); 0,94 (б); 2,2 (в), 3,2 (г). Пересечение нулевых осей соответствует центру большого вихря.

На рис. 5 представлен график распределения относительной тангенциальной скорости ветра в трех экспериментах: безразмерные радиальные профили скорости  $v(r)/V$  в зависимости от  $d/R$  по формуле (1) при значениях показателя  $b$  от 1 до 3. Радиус малых окружностей на кривых соответствует радиусу малого вихря, расположенного в соответствующих местах большого вихря. Цифры 1, 2, 3 в окружностях – номера экспериментов.



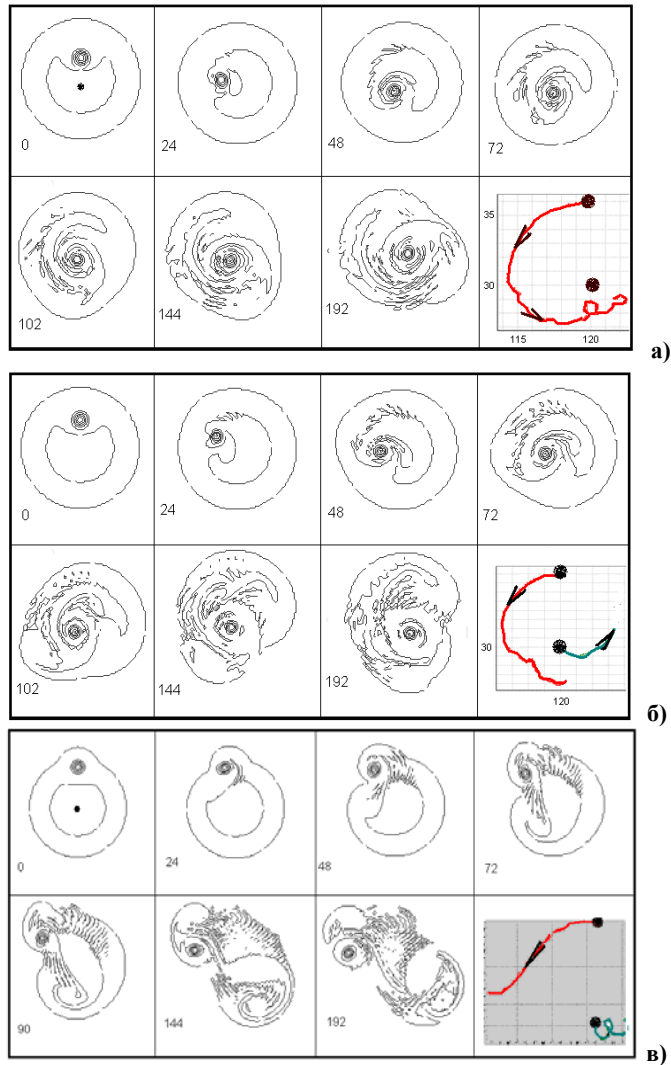
**Рис. 5.** Распределения относительной тангенциальной скорости ветра: безразмерные радиальные профили скорости  $v(r)/V$  в зависимости от  $d/R$  по формуле (1) при  $d/2Rb=0,94$  (1-й эксперимент); 2,2 (2-й); 3,2 (3-й).

При размещении малых вихрей в поле большого вихря на разные расстояния от его центра, они оказываются в разных полях скоростей ветра. Кроме того, разные части малых вихрей также находятся в зонах разных скоростей (рис. 5). На рис. 6 также видно, в какое место поля завихренности помещается малый вихрь.

На рис. 6 представлена динамика завихренностей большого и малого (черный кружок) вихрей и траектории перемещения их центров (в правой части рисунка) в трех экспериментах с малым вихрем, размещенным на разные расстояния от центра системы (рис. 6 а–в). При  $T=0$  окружности соответствуют изолиниям нулевой завихренности. Расчеты, выполнены на модели [5].

В первом эксперименте (рис. 6а) малый вихрь располагается ближе к центру системы, чем радиус максимальных ветров большого вихря. При этом одна его часть находится в области больших ветров, чем другая. Таким образом, сам вихрь несколько растягивается. Однако в этом случае это не очень заметно, так как малый вихрь находится близко от области максимальных скоростей, где малы градиенты скоростей.

В процессе интегрирования малый вихрь, деформируясь, вращается по циклонической спирали вокруг центра большого вихря, приближаясь к нему. В момент наибольшего приближения траектория малого вихря описывает петлю. Такие петли наблюдались в экспериментах, представленных в [6]. Центр "вихря – поля" остается в исходном положении, но структура большого вихря искажается (рис. 6а). Далее образуется вихревая структура, имеющая общий центр.



**Рис. 6.** Динамика завихренности большого и «малого» (черный кружок) вихрей при размещении малого вихря на различном расстоянии от центра системы (эксперименты а, б, в). Красная линия – траектория перемещения центра малого вихря, зеленая – большого. Цифрами показано время интегрирования (ч).



Во втором эксперименте (рис. 6б) центр малого вихря располагается дальше от центра системы и зоны максимальных скоростей большого вихря (рис. 5) (но в области положительной завихренности). Наблюдается искажение формы "вихря – поля", циклоническое вращение центров относительно друг друга и слабое расталкивание. В этом случае центр системы смещается.

В третьем эксперименте (рис. 6в) малый вихрь расположен в области значительно дальше зоны максимальных скоростей (в области отрицательной завихренности). В процессе интегрирования малый вихрь уходит от центра большого на юго-запад и разрывает область большого "вихря – поля". (Циклоны вокруг Антарктиды перемещаются так же, как и в эксперименте.)

Малый вихрь определенное время перемещается по циклонической орбите к краю поля, образуя в своем хвосте серию "вторичных" вихрей. При этом центр большого вихря описывает петлеобразную (трохоидальную) траекторию вблизи своего исходного положения. Такие траектории наблюдались в наших предыдущих исследованиях [6].

В этом случае скорость вращения их относительно друг друга уменьшается в процессе первоначального удаления их центров за счет более слабого взаимодействия полей малого и большого вихрей, а также за счет уменьшения скорости в самом "вихре – поле" при удалении от центра (рис. 5).

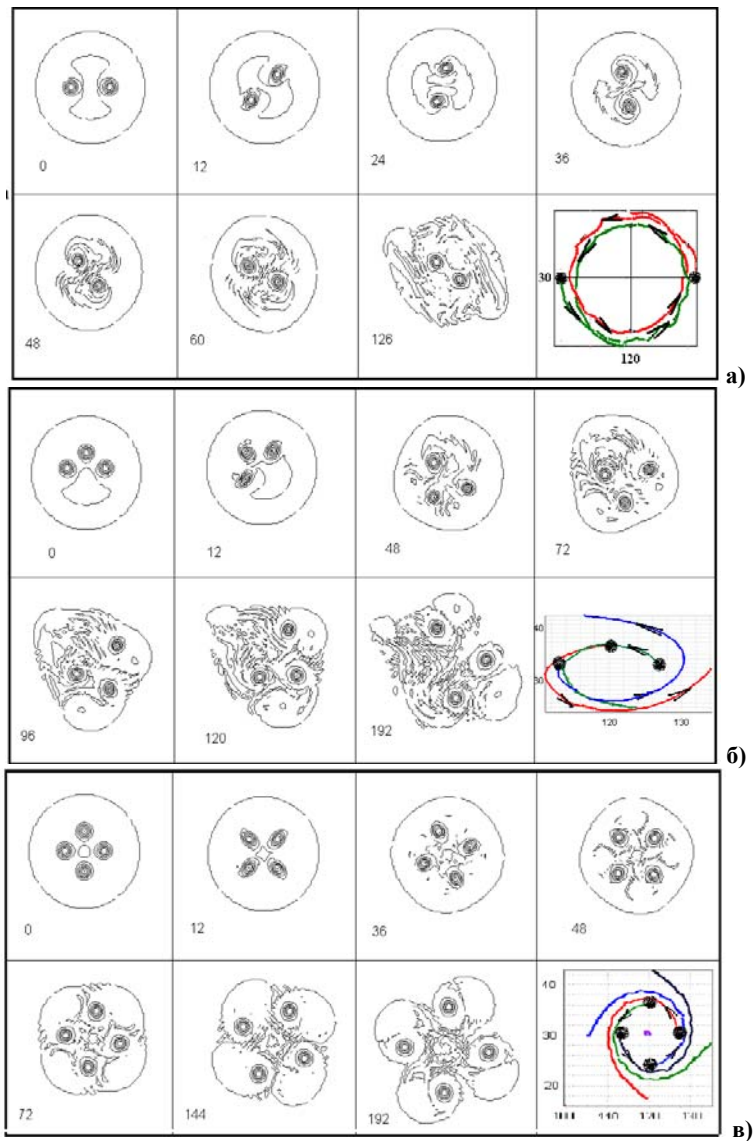
Итак, при малых первоначальных расстояниях между центрами вихрей (рис. 6а) наблюдается процесс сближения и, в определенный момент, слияния малого вихря и "вихря – поля" в большой вихрь с общим центром. При увеличении относительного первоначального расстояния между центрами вихрей до величины  $d/2R > 2,7-2,9$  и более (рис. 6б) имеет место удаление центров вихрей друг от друга. Это связано с тем, что при относительном расстоянии между центрами вихрей  $d/2R > 2,7-2,9$  в процессе интегрирования между парой исходных вихрей образуется серия малых вихрей с антициклонической завихренностью, поле которых способствует расталкиванию исходных вихрей.

В случае без вращающегося поля также наблюдались подобные процессы, однако динамика поведения вихрей существенно отличалась.

## ***2 серия. Группа вихрей во вращающемся поле***

Исследуется взаимодействие двух, трех и четырех вихрей во вращающемся поле (рис. 7). Расчеты, выполнены на модели [5].

В первом эксперименте (рис. 7а) в поле центрального вихря помещаем два малых вихря, расположенных друг от друга на расстоянии чуть меньше критического.



**Рис. 7.** Динамика завихренностей группы вихрей в экспериментах с двумя (а); тремя (б); четырьмя (в) вихрями. Цветные линии – траектории перемещения центров малых вихрей. Цифрами показано время интегрирования (ч).

При симметричном относительно центра поля размещении малых вихрей наблюдается почти равновесное взаимодействие вихрей (со слабым сближением) при циклоническом вращении. Это отличается от поведения пары вихрей без вращающегося поля (рис. 1).

Во втором эксперименте (рис. 7б – три вихря, располагаются на расстоянии несколько больше критического) в начале интегрирования система пытается привести вихри в равновесное состояние (образовав из их центров равносторонний треугольник), однако далее динамика системы изменяется и наблюдается их расталкивание с разной скоростью. В этом эксперименте образуются «вторичные» малые вихри [7–9], именно это и приводит к расталкиванию центров исходных малых вихрей.

В третьем эксперименте (рис. 7в – четыре вихря, располагаются на расстоянии значительно больше критического) также наблюдается образование "вторичных" малых вихрей и расталкивание исходных малых вихрей. При этом не нарушается симметрия их расположения, поскольку нарушение симметричности в процессе интегрирования в большой степени зависит от точности размещения вихрей. В этом эксперименте точность оказалась удовлетворительной.

### Заключение

Изучалось поведение группы вихрей во вращающемся поле и без него. Введение вращающегося поля приводит к смещению системы малых вихрей в определенном направлении с определенной скоростью и деформации разных частей вихрей с разной скоростью. Скорость смещения зависит от соотношения характеристик центрального и малых вихрей и их количества. За счет деформации малые вихри с определенного момента начинают а) сильнее или слабее взаимодействовать друг с другом; б) за ними при определенных условиях организуются "вторичные" вихри, которые также дают свой вклад в перемещение и взаимодействие малых вихрей.

### Список использованных источников

1. *Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л.* Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003. 503с.
2. *Богомолов В.А.* Модель колебания центров действия атмосферы // Известия РАН. ФАО. 1979. Т.15, № 3. С. 243-249.
3. *Борисов А.И., Мамаев И.С.* Математические методы динамики вихревых структур. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 368 с.
4. *Гусев А.М.* В снегах Антарктиды. М.: Изд. АН СССР, 1961. 190 с.
5. *Ситников И.Г., Зленко В.А.* Опыт численного прогноза траекторий тропических циклонов // Метеорология и гидрология. 1987. № 8. С. 40-47.

6. *Похил А.Э., Ситников И.Г., Зленко В.А., Полякова И.В.* Численные эксперименты по исследованию взаимодействующих атмосферных вихрей // *Метеорология и гидрология*. 1990. № 4. С. 21-28.

7. *Похил А.Э., Горлач И.А.* Образование малых вихрей в верхней тропосфере и блокирующие ситуации // *Труды Гидрометцентра России*. 2015. Вып. 357. С. 33-50.

8. *Похил А.Э.* Исследование случаев образования и взаимодействия малых вихрей в атмосфере // *Труды Гидрометцентра России*. 2016. Вып. 362. С. 172-192.

9. *Margolin A., Pokhil A.* About the formation of a cloud of small vortices in the case of the interaction of a few larger vortices of finite dimensions // *Res. Act. Atm. Ocean Model*. 2000. WMO/TD- No.39. P. 25-26.

*Поступила в редакцию 23.05.2017 г.*