

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛУЧАЕВ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «МАЛЫХ» ВИХРЕЙ В АТМОСФЕРЕ

А.Э. Похил

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации;
AEPokhil@yandex.ru*

Введение

При исследовании верхних слоев тропосферы в диапазоне излучения водяного пара (ВП) были обнаружены несколько случаев образования мезомасштабных вихрей, наблюдавшихся на границе между близко расположенными обширными атмосферными вихрями (циклонами – антициклонами). Один из случаев имел место 11 мая 1998 г. над Восточной Европой (спутник Meteosat 7, рис. 1).

Другой наблюдался над Западной Европой 15 января 2006 г. с 3 ч 15 мин по 17 ч (Meteosat-8). Подобная система вихрей появилась также над восточной частью Атлантического океана вблизи Западной Европы и существовала с 10 ч 30 мин 17 июня по 18 ч 30 мин ВСВ 19 июня 2010 г. (Meteosat-9). Представленные ситуации рассматриваются в [4].

Керкман в [9] обсуждает последний из названных случаев. Вихри развивались вдоль разрушающейся фронтальной системы, которая становилась блокирующей для системы стабильно высокого давления над Восточной Европой. В этой блокирующей ситуации длинные волны верхнего уровня перемещались с запада (относительно фронтальной системы), разрушаясь, в то время как в направлении запада перемещается другая область пониженного давления.

Автор предлагает такое объяснение формирования «малых» вихрей: когда ложбина становится достаточно узкой и завихренность увеличивается, поток становится нестабильным и ложбина

разрушается (распадается на малые вихри). Автор считает, что этот случай есть пример перекачки энергии от больших масштабов к малым. Предположение о подобной передаче энергии высказывалось ранее в [6].

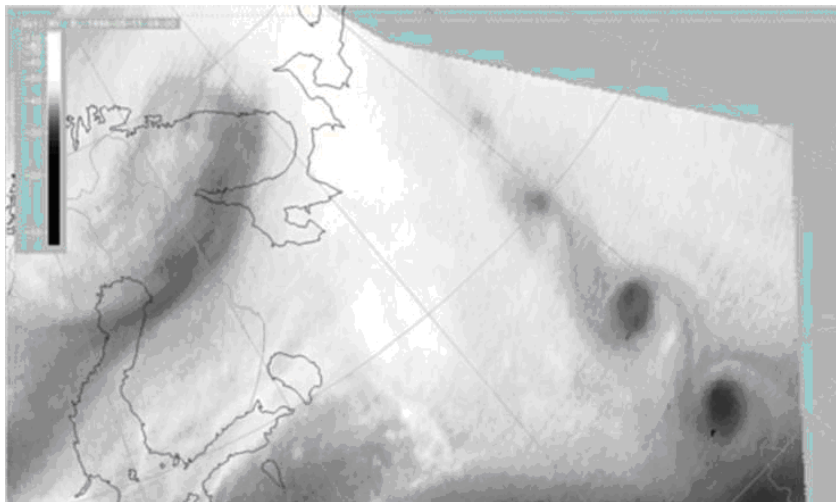


Рис. 1. Спутниковый снимок поля суммарного водяного пара (уровни 300–600 гПа) Meteosat-7, 11 мая 1998 г.

Но что значит «ложбина становится достаточно узкой»? Какие критерии «узости» ложбины? В какой момент возникают «малые» вихри? Мы попытаемся ответить на эти вопросы.

Керкман не нашел других (кроме июня 2010 г.) ситуаций, подтверждающих его предположение. В [7] говорится о нелинейной неустойчивости, в которой большую роль играет нелинейный обмен энергией, как с волнами сравнимых длин (крупномасштабными), так и с синоптическими вихрями. В наших случаях обмен происходит и с вихрями более мелких масштабов (мезовихрями). В [10] с помощью двумерной баротропной модели исследуется появление тонкого слоя колец, встроенных в почти безвихревой поток. Подобные условия иногда создаются при активизации ураганов. С помощью модели установлено, что такие нестабильные образования (кольца) быстро распадаются на ряд мезовихрей. При этом

большой завихренности в первоначальном кольце сопутствуют резкие изменения давления в «малых» вихрях, и они могут быть значительными. При слиянии «малых» вихрей возможно резкое понижение давления в центре глаза урагана, тайфуна.

Рассмотрим различные ситуации, при которых наблюдалось появление «малых» вихрей.

Образование «малых» вихрей в реальной ситуации и на модели

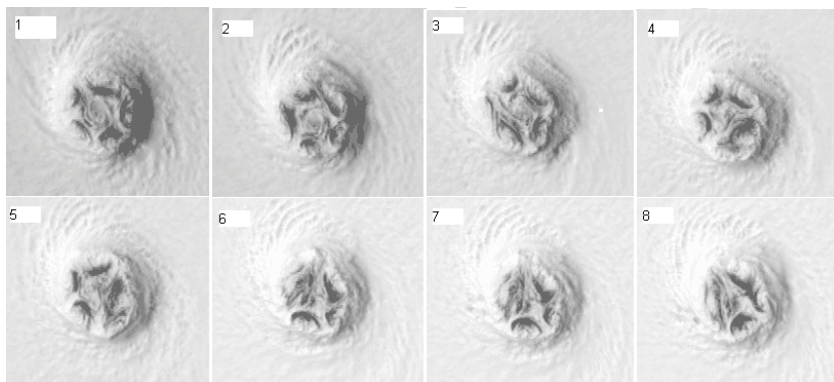
Один из примеров появления «малых» вихрей в глазе урагана.

При наблюдениях за перемещением урагана Изабель (Атлантический океан, сентябрь 2003 г.) на снимках со стационарного спутника GOES-12 в глазе урагана в видимом диапазоне частот были обнаружены необычные пятна-структуры – «малые» (относительно размеров урагана) вихри. (Похоже, это именно то, о чем говорится в [10]). Такие регулярные структуры в глазе урагана очень редкое явление, и их возникновение связано с определенными условиями. Одним из условий может быть прохождение над пятнами «горячей» воды в океане, когда особенно велики встречные восходящие и нисходящие потоки воздуха, градиенты скоростей и турбулентность. Именно при выходе Изабель на ядро воды с температурой 30,5 °С и появились структуры в виде вихрей около границы глаза урагана. Скорость ветра в это время в урагане достигла 85 м/с.

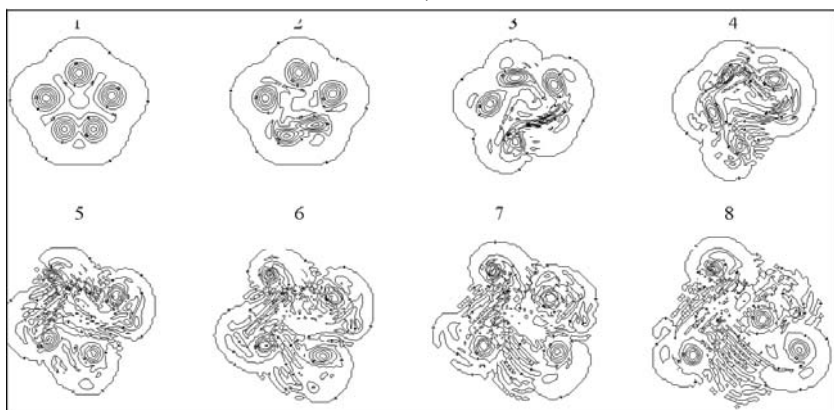
Весьма вероятно, что обсуждаемые структуры являются вихрями типа мезоциклонов или смерчей. «Глаз» во время наблюдения имел диаметр 35–40 км. Диаметр каждого «малого» вихря внутри глаза – 8–12 км [2].

Интересно проследить динамику системы из пяти вихрей, образовавшихся в глазе урагана Изабель (рис. 2 а).

Анализ наблюдений показывает, что эта система вихрей в «глазе» постепенно трансформировалась. Один из пяти вихрей начал притягивать к себе и захватывать соседний вихрь, в результате чего образовалась система четырех вращающихся вокруг центра вихрей. Далее происходили довольно сложные деформации, в результате которых сформировалась картина из трех растянутых вихрей. На рис. 2 а хорошо видно, как это происходит.



а)



б)

Рис. 2. Динамика системы из пяти вихрей, образовавшихся в глазе урагана Изабель (Атлантический океан, 12 сентября 2003 г., 12 ч 45 мин – 14 ч 11 мин, спутниковая информация) (а); поведение на модели вихрей, подобных обнаруженным в глазе урагана Изабель (б). Цифры на рисунке означают последовательные этапы эволюции вихрей.

К сожалению, спутниковая информация в 14 ч 11 мин 12 сентября 2003 г. перестала передаваться, и мы не смогли проследить дальнейшее поведение «малых» вихрей.

Понять поведение этих структур помогли численные эксперименты [2] на баротропной модели [1] с пятью вихрями, расположенными в вершинах пятиугольника (рис. 2 б). Сравнение вращения и трансформации вихрей, наблюдаемых в глазе урагана Изабель, с экспериментами на численной модели в общих чертах схожи: система из пяти вихрей трансформируется в систему четырех, а затем и трех вихрей. Эксперимент позволил подробно проследить, как происходит взаимодействие вихрей, почему и в какой момент вихри начинают взаимодействовать и объединяются.

Хорошо видно, что взаимодействие «малых» вихрей на модели (рис. 2 б) сопровождается образованием еще более мелких структур. Это есть пример перекачки энергии от больших масштабов к малым.

Другой пример образования «малых» вихрей наблюдался при взаимодействии двух реальных тайфунов Тихого океана, приведен на рис. 3 а. Спутниковые снимки дают четкую картину появления «малых» вихрей между двумя близко расположенными и взаимодействующими тайфунами Тихого океана.

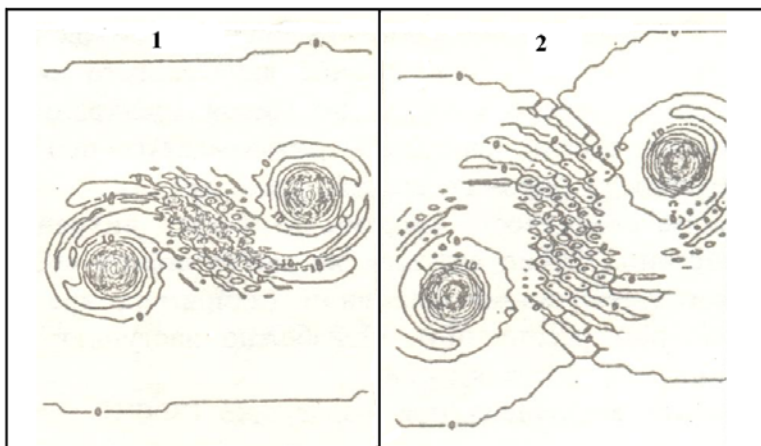
Численный эксперимент [11] демонстрирует ситуацию появления «малых» вихрей (рис 3 б), подобную представленной на спутниковом снимке. Интересно также отметить, что картинка на рис. 3 а подобна реальной ситуации с «малыми» вихрями, возникшими между двумя большими образованиями: циклоном и антициклоном (см. рис. 1).

Автор настоящей работы, как упоминалось выше, ранее исследовал взаимодействие больших вихрей (тайфунов) в Тихом океане [3] и на численной модели [5, 11]. С помощью расчетов на численной баротропной модели изучалось взаимодействие двух и более (до пяти) распределенных вихрей конечного размера, в которых расстояние между отдельными вихрями было сравнимо с их размерами. Появление вторичных «малых» вихрей наблюдалось при взаимодействии пары циклонических и пары антициклонических вихрей, а также пары, состоящей из циклонического и антициклонического вихрей [5, 11].

Представим результаты исследований на численной модели поведения ансамблей таких вихрей. Для расчетов использовалась баротропная модель на основе уравнений мелкой воды.



а)



б)

Рис. 3. Спутниковый снимок появления «малых» вихрей между двумя тайфунами Тихого океана (а); численный эксперимент, повторяющий реальную ситуацию, подобную представленной на спутниковом снимке (б).

Рассмотрим условия, при которых возникают вторичные малые вихри при взаимодействии двух или нескольких вихревых образований.

На численной модели [1] исследовалась эволюция системы вихрей с одинаковым и различным полем скорости, с одинаковым и различным направлением вращения. Вихри во всех численных экспериментах посажены вблизи центра расчетного поля и в течение расчета не достигают границ поля. Рассматривался профиль тангенциальной компоненты скорости ветра в вихре, описываемый уравнением вида:

$$V(r) = V(r/R) \exp \left[\frac{1}{b} \cdot \left(1 - (r/R)^b \right) \right]. \quad (1)$$

Радиальные профили завихренности при этом выглядят таким образом:

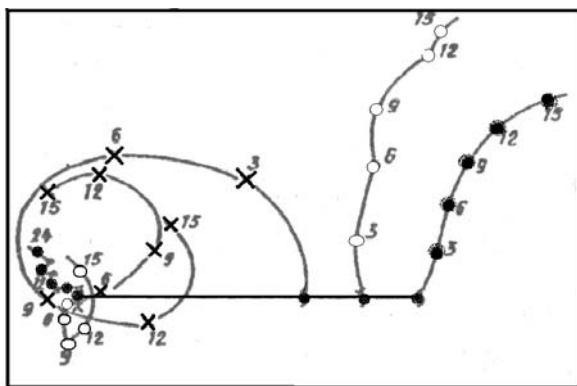
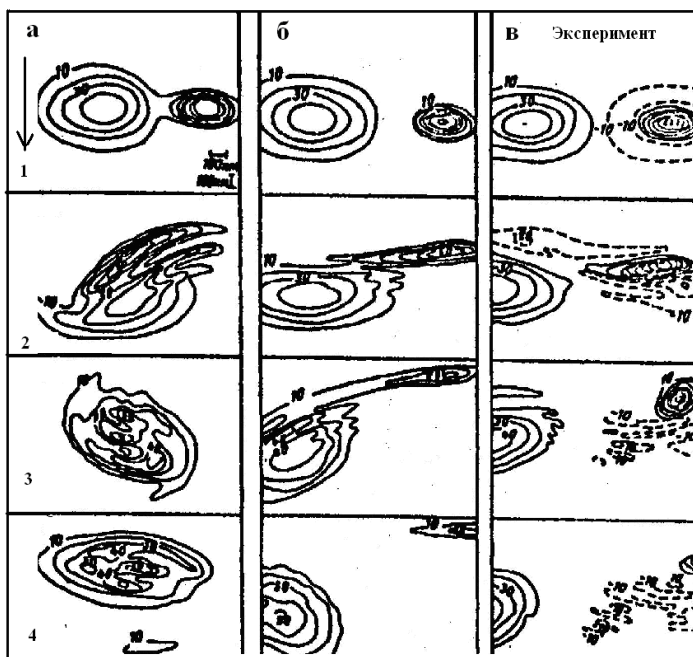
$$\xi(r) = 2V/R \cdot \left[1 - 0,5 (r/R)^b \right] \cdot \exp \left[\frac{1}{b} \cdot \left(1 - (r/R)^b \right) \right], \quad (2)$$

где r – расстояние от центра вихря; V – максимум тангенциальной составляющей скорости ветра; R – радиус максимальных ветров – расстояние, на котором достигается V ; b – параметр, определяющий изменение тангенциальной составляющей скорости ветра вдоль радиуса (крутизна спада скорости ветра). В настоящей работе принято $b = 2,0$. Это наиболее устойчивые компактные вихри. (В ранних работах автора исследовалось поведение вихрей с $b = 0,3-5,0$).

Рассмотрим взаимодействие двух циклонических вихрей. Эволюция взаимодействия вихрей в трех экспериментах представлена на рис. 4 а–в. На рис. 4 г представлены траектории центров пары циклонических вихрей при различных расстояниях между ними.

Для принятого в наших исследованиях профиля скорости вихрей получено критическое соотношение $d/R = 2,7$, где d – расстояние между центрами вихрей.

Относительным «критическим» расстоянием d/R между центрами вихрей называется такое расстояние, при котором они в процессе интегрирования при относительном циклоническом вращении находятся на неизменном расстоянии друг от друга, либо слабо колеблются около исходного расстояния.



г)

Рис. 4. Динамика пары взаимодействующих вихрей: три эксперимента с различными исходными расстояниями между центрами вихрей (а–в); траектории центров пары взаимодействующих вихрей, расположенных на различных расстояниях (г).

При уменьшении исходного расстояния между центрами вихрей ($d/R < 2,7$), они начинают сближаться и сливаются (рис. 4 а, г). При увеличении исходного расстояния между их центрами ($d/R > 2,7$), вокруг пары вихрей могут образовываться вторичные малые вихри (рис. 4 в) с циклонической или антициклонической завихренностью. Они могут усиливать или ослаблять друг друга.

Наблюдались ситуации, когда при значительном удалении центров исходных вихрей они вначале не взаимодействуют друг с другом; однако через определенное время начинают «чувствовать соседа». Назовем это «эффектом дальнего действия». Этот эффект предполагает перенос энергии или вещества из зоны одного вихря в зону другого волнами (или вихрями) и это связано с экстремальными температурными и барическими условиями. В этих случаях вблизи исходных вихрей возникают «вторичные» вихри, которые, достигая соседнего вихря, начинают взаимодействовать с ним.

При взаимодействии различных по характеристикам циклонических вихрей один может втянуть в свою циркуляцию другой (рис 4 а), а также может частично захватить соседний вихрь (рис. 4 б). Хорошо видно на рис. 4 а, что исходные вихри в течение эксперимента сближаются при относительном циклоническом вращении, и больший захватывает и «накручивает на себя» меньший. На рис 4 б вихри с теми же характеристиками расположены на несколько большем расстоянии друг от друга. В этом случае также наблюдается относительное циклоническое вращение, но энергии большого вихря недостаточно для полного захвата меньшего. Он разрывает малый вихрь, часть его накручивает на себя, а оставшаяся часть отталкивается и удаляется в северо-восточном направлении. В этих экспериментах малые вторичные вихри не образуются.

Наблюдения показывают, что в эксперименте, представленном на рис. 4 в, правый меньший вихрь концентрируется, становится более компактным и, соответственно, «крутизна спада» его увеличивается. Между парой исходных вихрей организуется зона отрицательной завихренности и начинается образование «малых» вихрей.

Итак, образование «малых» вихрей происходит в области между двумя вихревыми структурами при увеличении крутизны спада профиля скорости (изменении b), если градиенты скорости, температуры и давления между ними достигают определенного значения. В этом случае наблюдается «расталкивание» одноименных вихрей при относительном антициклоническом вращении (рис. 4 г).

Этому способствуют те самые малые вихри. Интересно отметить, что этот эффект противоположен эффекту Фудзивара [8].

Итак, результатом исследований явился вывод: взаимодействие двух модельных вихрей может иметь самый разнообразный характер в зависимости от параметров вихрей (в частности, от профиля скорости ветра в вихрях) и расстояния между ними. На основании численного эксперимента показано, что подбором названных параметров на модели удавалось придать поведению и траектории вихрей различный ход: захват, отталкивание или сближение вихрей, изменение их размеров и формы, резкое изменение их поведения при слабом изменении характеристик вихрей, а также воспроизвести петлеобразное движение центра (рис. 4 г) и образование вторичных «малых» вихрей.

В одной из наших работ [11] представлены результаты аналитических расчетов, показавшие, что образование «малых» вихрей происходит при определенных соотношениях моментов количества движения, энергий и крутизны спада профиля скорости в исходных вихрях. Расчеты позволили приближенно оценить количество и суммарную массу образованных «малых» вихрей исходя из законов сохранения массы, момента импульса и энергии. Эти результаты практически не зависят от знака образовавшихся «малых» вихрей, оставаясь неизменными и в том случае, если имеются вихри разных знаков. Получено также, что общая масса «малых» вихрей слабо зависит от их максимальной скорости.

Рассмотрим далее динамику поведения **трех взаимодействующих вихрей**. Заметим, что взаимодействие трех [6] и более вихрей на численной модели [5, 11] и в Тихом океане [3] впервые исследовано автором данной работы с соавторами.

На рис. 5 представлена динамика поведения вихрей в трех экспериментах с различными исходными соотношениями

характеристик вихрей, расположениями и расстояниями между их центрами. Во всех экспериментах характеристики вихрей и расстояния между ними подобраны таким образом (см. выше), что всегда при их взаимодействии образуются малые вихри.

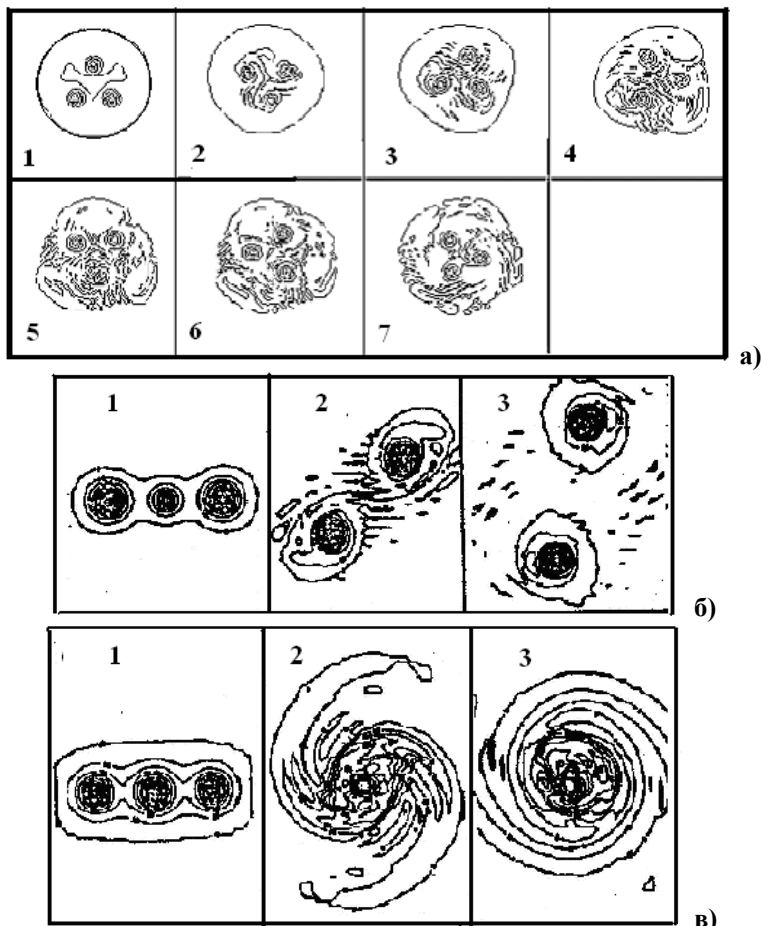


Рис. 5. Динамика трех взаимодействующих вихрей: три эксперимента (а, б, в) с различными исходными соотношениями характеристик и расстояниями между центрами вихрей.

В первом эксперименте условия взаимодействия вихрей таковы: центры их находятся на расстоянии, близком к критическому, и, соответственно, вихри колеблются около исходного положения. В этих условиях активное образование «малых» вихрей происходит даже при слабом расталкивании вихрей.

Экспериментально установлено, что при определенных условиях при взаимодействии вихрей изменяется их структура. Они становятся более компактными (рис 5 а), как это происходило и в описанных выше экспериментах; крутизна спада скорости ветра увеличивается и образуются «малые» вихри.

Во втором эксперименте (рис. 5 б) образование «малых» вихрей происходит, когда периферийные вихри разрывают и накручивают на себя части более слабого центрального вихря. Превратившись в два более мощных вихря, они ведут себя аналогично поведению двух вихрей в третьем эксперименте на рис. 4. При этом структура вновь образованных вихрей, естественно, изменяется.

В третьем эксперименте (рис. 5 в) три исходных вихря объединяются в один большой. В этом случае в центре большого вновь образованного вихря наблюдается ситуация, аналогичная той, что имела место в урагане Изабель, когда в его глазе образовалось несколько «малых» вихревых структур.

Рассмотрим, что происходит с ансамблем из **четырёх взаимодействующих вихрей**. Результаты расчетов представлены на рис. 6.

Показана динамика вихрей в трех экспериментах с различными характеристиками и расположениями их центров. Поведение вихрей во всех случаях различно, однако их параметры подобраны в соответствии с предыдущими выводами таким образом, что между ними в определенный момент начинают образовываться «малые» вихри. В двух первых экспериментах (рис. 6 а, б) при образовании вторичных вихрей наблюдается расталкивание вихрей. В последнем (рис. 6 в) эксперименте соотношение всех характеристик исходных вихрей таково, что имеет место сильное взаимодействие. При этом наблюдается постепенное слияние двух нижних вихрей, расположенных несколько ближе друг к другу (меньше критического расстояния), чем остальные.

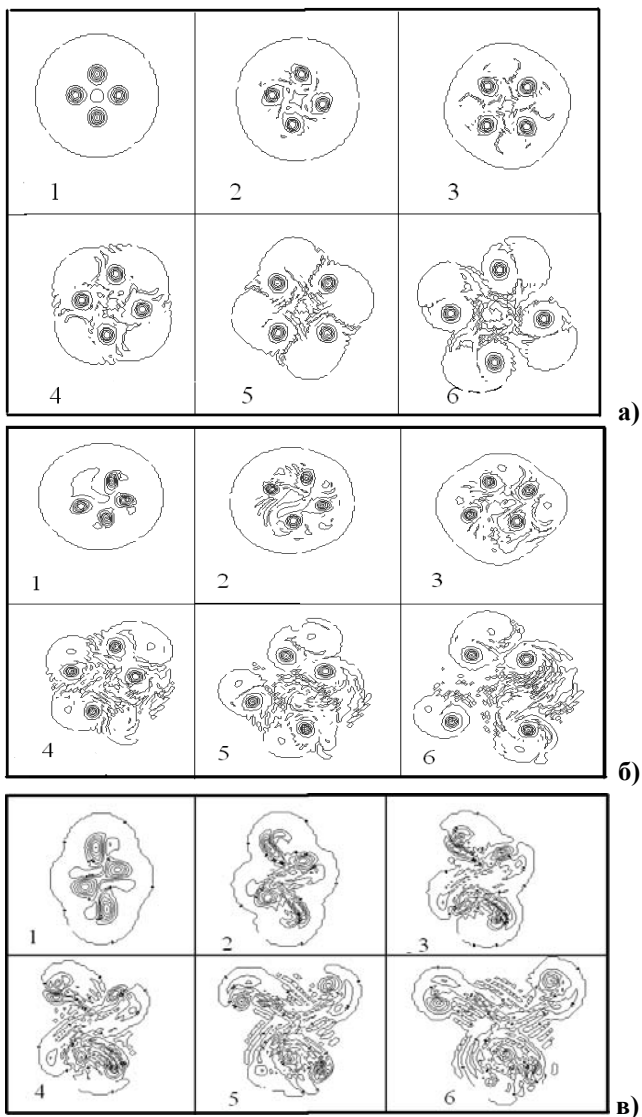


Рис. 6. Динамика системы из четырех взаимодействующих вихрей с различными интенсивностями и расстояниями между центрами в трех экспериментах (а, б, в).

В результате в конце эксперимента образуется система, состоящая из трех вихрей (так как это имело место при взаимодействии «малых» вихрей в глазу тайфуна Изабель), между которыми также возникают вторичные вихри, способствующие расталкиванию трех вновь образованных вихрей.

В тайфуне Изабель расталкивания «малых» вихрей не наблюдается, так как они находятся во вращающейся системе, каковой является сам тайфун (в кольце больших скоростей), ограничивающей их перемещение. Результаты исследования взаимодействия вихрей во вращающейся системе будут представлены в следующей статье.

Два эксперимента с **пятью вихрями** представлены на рис. 7.

В первом эксперименте параметры исходных вихрей и расстояние между их центрами (меньше критического) таковы, что происходит их слияние, и в конце интегрирования наблюдается один большой вихрь. Во втором эксперименте соотношения характеристик подобраны таким образом, чтобы поведение вихрей было подобно тому, что происходило в реальной ситуации 2010 г. (см. ниже). В этом случае наблюдается относительное циклоническое вращение и расталкивание.

Итак, в результате проведения численных экспериментов мы научились (на модели) предопределять и задавать поведение взаимодействующих вихрей, подбирая соотношения их первоначальных характеристик: (профиля скорости, моментов количества движения и энергий). Научились «заставлять» вихри притягиваться или расталкиваться, перемещаться по заданным траекториям (прямолинейным, петлеобразным, циклоническим и антициклоническим), накручиваться друг на друга, «отбрасывать хвосты» (что также приводит к симметризации исходных вихрей и возникновению «малых» вихрей), усиливаться или диссипировать, образовывать новые области завихренности – «малые» вихри.

Поведение реальных вихрей в июне 2010 года

Обратимся к рассмотрению поведения группы реальных вихрей пара («малых» вихрей, образовавшихся между двух огромных вихревых систем), состоящей из нескольких образований, обозначенных цифрами на рис. 8.

Использовались данные, полученные с МЕТЕОСАТ-9, в диапазоне излучения водяного пара (Water Vapor Vortex 6,2 мкм).
 Время наблюдения: с 06 ч 17 июня до 18 ч 19 июня 2010 года.

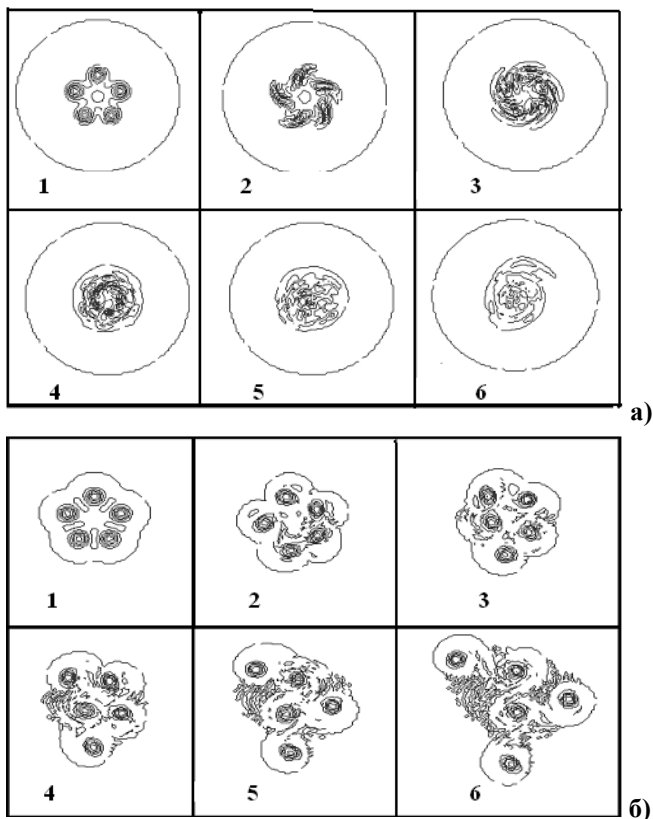


Рис. 7. Динамика системы из пяти вихрей с различными расстояниями между центрами и соотношениями интенсивностей в двух экспериментах (а, б).

На рис. 9 представлены моменты, наиболее ярко описывающие динамику возникновения и взаимодействия нескольких (от двух до шести) ВП. Спутниковые снимки показывают последовательные изменения взаимного расположения ВП, входящих

в группу вихрей, с различными расстояниями между их центрами. поведение этих вторичных «малых» вихрей хорошо описывается приведенными выше численными экспериментами.

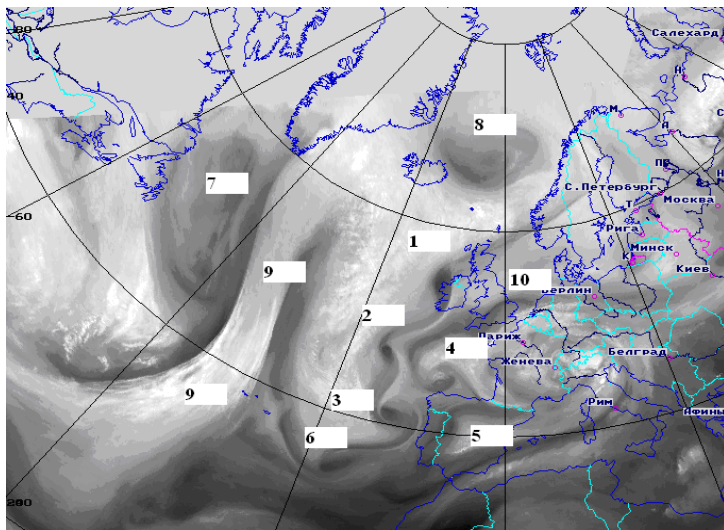
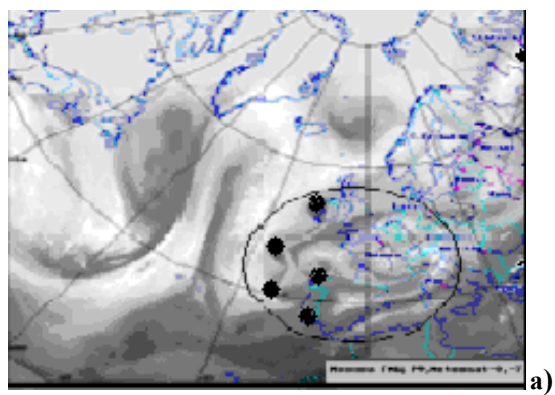


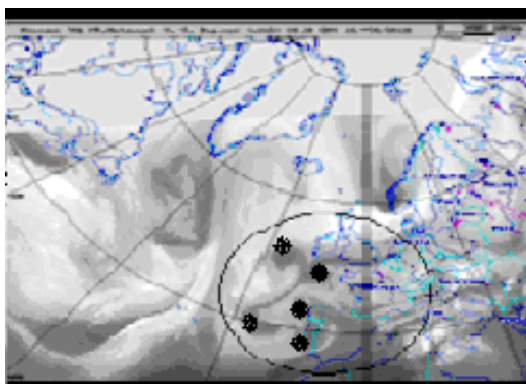
Рис. 8. Спутниковый снимок группы «малых» вихрей пара (обозначенных цифрами 1–6), образовавшихся между больших вихревых систем (7–10).

Три вихря (южные 2, 3, 4) (рис. 9 а), имеющие близкие характеристики, исходно были расположены в «вершинах треугольника». Средний диаметр вихрей составлял 300–500 км. Они находились достаточно близко друг от друга, на таких расстояниях, что было возможно взаимодействие по закону Фудзивара [8]. (Другие вихри, входящие в рассматриваемую систему, некоторое время не оказывали на них влияния).

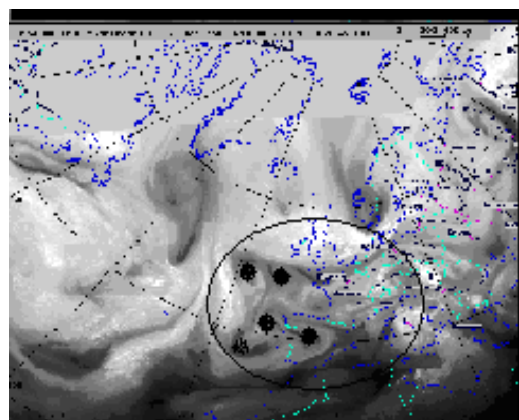
Вначале эти три вихря вращались по циклонической орбите относительно друг друга и слабо сближались (рис. 9 а–г). Однако с определенного момента начали расталкиваться. Эта ситуация соответствует эксперименту, в котором вихри расположены на расстоянии, близком к критическому. Выше представлены результаты численного эксперимента, воспроизводящие подобную ситуацию (рис. 5 а).



a)



b)



B)

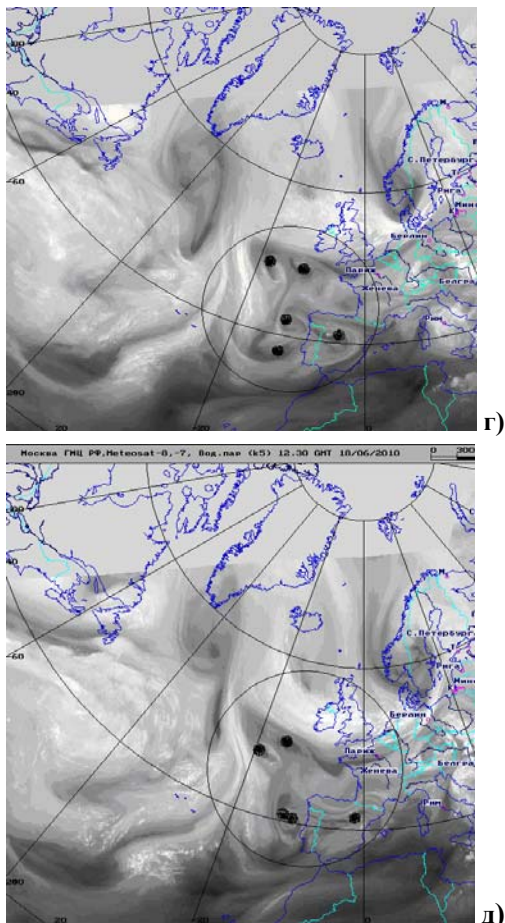


Рис. 9. Спутниковые снимки, показывающие динамику (а–д) системы из нескольких ВП. Окружностями выделена исследуемая область взаимодействия вихрей, черными точками – положения «малых» вихрей.

Севернее вихрей 2, 3, 4 организуется новый вихрь 1 (рис. 8). Однако, как уже отмечалось выше, он некоторое время находится на «критическом» расстоянии от вихря 2, наиболее близкого расположенного к нему. Поэтому определенное время эти вихри

находились на неизменном расстоянии. С момента, когда из-за влияния окружающей атмосферы они несколько сблизились, начинается активное взаимодействие вихрей 1 и 2. При этом поведение всей системы усложняется (рис. 9 г, д).

В процессе взаимодействия с окружающей атмосферой вся система вихрей опускается на юго-запад. В определенный момент (рис. 9 г) вихри 2, 3, 4, вращаясь относительно друг друга по циклонической орбите, начинают перемещаться на восток. Южный вихрь 3 из этой системы перемещается к Португалии. В то же время вихрь 4 смещается в сторону Бискайского залива.

Слева от этой системы на севере Атлантического океана расположилась огромная фронтальная зона (см. рис. 8) шириной 300–600 км и протяженностью от 20 до 65° с. ш., входящая в систему громадного циклонического вихря над Атлантическим океаном. В это образование начинает затягиваться малый вихрь 6. В это же время в Норвежском море между Исландией и Норвегией находится еще один огромный циклонический вихрь (рис. 8), он смещается к югу Норвегии.

Далее «малые» вихри втягиваются в циркуляцию больших вихревых систем и прекращают свое существование.

Заключение

На основании наблюдений над поведением групп «малых» ВП, наблюдавшихся на границе между огромными вихревыми образованиями; вихрей, возникших между двумя тайфунами в Тихом океане; вихрей в глазе урагана, а также исследований, проведенных на численной модели, получены следующие результаты.

1. Взаимодействие вихревых систем при определенных условиях сопровождается образованием облака вторичных «малых» вихрей, которые, взаимодействуя с исходными вихрями, могут существенно изменить их поведение.

2. Рассчитаны эволюции ансамблей нескольких вихрей конечного размера с одинаковыми и различными полями скорости, в которых расстояние между отдельными вихрями сравнимо с их размерами. Расчеты дали информацию об их расталкивании, сближении, дроблении, изменении размеров и формы.

3. Показано, что при определенных условиях взаимодействие «малых» вихрей сопровождается образованием вторичных, еще более «малых» вихрей.

4. Получено, что эволюция группы из нескольких вихрей может происходить по разным сценариям при слабом изменении параметров системы.

5. Представлены некоторые возможные варианты динамики группы вихрей при их взаимодействии.

6. Предложено объяснение взаимодействия вихрей, достаточно далеко удаленных друг от друга – эффект «дальнего действия».

7. На численной модели удалось воссоздать динамику пары реальных тайфунов, а также «малых» вихрей, образовавшихся в глазе урагана Изабель. Поведение вихрей, рассчитанных на модели, хорошо коррелируется с динамикой вихрей, наблюдаемых в атмосфере.

Автор благодарит И.А. Горлач за предоставление спутниковой информации по вихрям пара.

Список использованных источников

1. Зленко В.А., Ситников И.Г. Опыт численного прогноза траекторий тропических циклонов // Метеорология и гидрология. – 1987. – № 8. – С. 40–47.

2. Похил А.Э., Марголин А.Д. О пятнах в глазе урагана // ДАН. – 2006. – Т. 406, № 3. – С. 388–389.

3. Похил А.Э. О нескольких случаях взаимодействия тропических циклонов в Тихом океане в сезон 1988 г. // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 6. – С. 60–67.

4. Похил А.Э., Горлач И.А. Образование «малых» вихрей в верхней тропосфере и блокирующие ситуации // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 357. – С. 33–50.

5. Похил А.Э. О возникновении и разрушении вторичных вихрей в процессе взаимодействия двух тропических циклонов (численный эксперимент) // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 9. – С. 34–41.

6. Сперанская А.А., Анисимова Е. П., Похил А.Э. Пограничный слой океан – атмосфера и тропические циклоны // Потoki и структуры в жидкостях: сборник докладов на международной конференции. – 2005. – С. 273–276.

7. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 11. – С. 5–18.

8. Fujiwhara S. The natural tendency towards symmetry of motion and its application as a principle in meteorology // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. – 1921. – Vol. 7. – P. 287–293.

9. Kerkmann J. Water vapour vortices over Western Europe Posted: Fri Mar 17, 2006 2:43 pm Post subject: WV vortices.

10. Kosssin J., Schubert W. Mesovortices, Polygonal Flow Patterns, and Rapid Pressure Falls in Hurricane –Like Vortices // J. Atm. Sci. – 2001. – Vol. 58. – P. 2196.

11. 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. – 2009. – WMO/TD-N 39. – P. 25–26.

Поступила в редакцию 10.08.2016 г.