

УДК 551.555.9

Г.П.Ивус, к.геогр.н., О.Н.Грушевский, к.геогр.н., А.Е.Ешану, асп.
Одесский государственный экологический университет

ТРЕХМЕРНАЯ СТРУКТУРА ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ОБЛАСТИ α - МЕЗОМАСШТАБНЫХ БАРОКЛИННЫХ ЗОН – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕЙ

(I часть)

ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И МЕЗОМАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ЗАВИХРЕННОСТИ АТМОСФЕРНОГО ФРОНТА

На основании данных дропзондирования рассматривается структура поля завихренности фронтальной зоны в пределах пограничного слоя атмосферы. На уровне качественного согласия показано, что характер изэнтропического движения в горизонтальной и вертикальной плоскостях отражает особенности кинематической структуры поля скорости в области атмосферного фронта.

Ключевые слова: мезомасштабные данные, поле относительного вихря, вертикальные разрезы полей потенциальной температуры и завихренности.

Введение. Процессы фронтогенеза, непрерывно наблюдающиеся в тропосфере, являются следствием полей движения, связанных с бароклиными возмущениями. Особенности этих движений таковы, что, вызывая на определенном этапе концентрацию фронтальных свойств в зонах разрешения различных видов неустойчивости (статической или гидродинамической), они порождают движения (как правило, агеострофического характера), которые приводят к сглаживанию градиентов величин поля температуры. Далее, в процессе эволюции неустойчивых возмущений, контрасты температур снова увеличиваются, придавая, таким образом, данному процессу непрерывный характер.

При исследовании структуры мезомасштабных циркуляционных механизмов важно понимать, что силы, постоянно действующие в атмосфере, имеют для них несколько иное, чем для крупномасштабных движений, значение. Правильная интерпретация соотношения сил, действующих на тот или иной мезомасштабный объект, позволяет, например, идентифицировать вид неустойчивости, являющейся основным механизмом возникновения циркуляций.

Для мезомасштабных движений в области атмосферных фронтов (АФ) таким механизмом является симметричная неустойчивость, следствием которой является возникновение поперечных относительно линии фронта циркуляций в вертикальной плоскости. Одновременно с этим, горизонтальная конвергенция приводит к генерации полей завихренности в наклонной области фронтального раздела, осуществляя, тем самым, взаимодействие синоптических и мезомасштабных возмущений в области АФ и вызывая перераспределение фронтальных свойств.

Употребление термина «фронтальные свойства» вызвано тем, что эффекты фронтогенеза и фронтолиза на различных уровнях имеют различный смысл. Например, в ниже- или среднетропосферной части фронта главным их критерием будут процессы конвергенции (и, как следствие, увеличение завихренности), а выше – характер вертикальных циркуляций (термически прямые или обратные) по обе стороны фронта и угол его наклона.

Таким образом, исследование структуры вихревых полей в зоне АФ позволяет сформировать представление о:

- а) распределении фронтогенетических эффектов вдоль линии фронта;

б) конфигурации мезомасштабных воздушных потоков (направлении и скорости переноса физических свойств) вдоль линии фронта и, шире, в системе движений воздуха в циклоне;

в) роли нижнетропосферных пульсаций поля скорости в условиях уменьшения статической и гидродинамической устойчивости в едином процессе цикло- и фронтогенеза.

Актуальность и постановка задачи. Всплеск интереса к особенностям мезомасштабной структуры АФ, наблюдавшийся в 70-80-х годах прошлого века, привел к получению экспериментальных данных, которые позволили уточнить уже имеющиеся теоретические положения. В частности, удалось выявить трехмерную структуру поля скоростей, определяющую эволюцию температурных контрастов, выделить теплые и холодные «несущие» полосы в структуре мезомасштабных движений циклона, установить закономерности распределения фронтальных осадков и выдвинуть гипотезы о механизмах формирования такого распределения.

Вместе с тем, возник ряд проблем, основной смысл которых состоит в том, что существующие модели описывают наиболее общие закономерности фронтов и не отражают роль отдельных факторов в процессах фронтогенеза и фронтолиза. По всей видимости, это связано с упрощением исходных уравнений (плоское приближение, некорректный учет турбулентного обмена, поля влажности и т.д.), что ведет к построению идеализированных модельных данных. Казалось бы, привлечение данных мезомасштабных наблюдений могло бы стать одним из инструментов минимизации существующих недостатков моделей. Однако, как известно, значения мезомасштабных пространственно - временных характеристик АФ сильно варьируют от случая к случаю. Производство же регулярных мезомасштабных наблюдений осложняется своей затратностью и не везде имеющейся возможностью их осуществления, а полнота – отсутствием комплексности. Поэтому современные публикации содержат крайне мало исследований, посвященных выполнению сравнительного анализа модельных данных с данными мезомасштабных измерений.

Такие малоосвещенные в вопросах динамики атмосферных фронтов вопросы как причины формирования и конфигурация «несущих полос» (в особенности теплой), их пространственно - временная эволюция и трехмерная структура, перенос влажности и его влияние на развитие циклона, процессы фронтогенеза и фронтолиза, распространение верхне- и нижнетропосферных циркуляций на ниже- или вышележащие уровни обуславливают актуальность исследований в данном направлении.

Целью данной статьи является исследование трехмерной структуры воздушных потоков в зоне повышенной бароклинности для оценки возможности их дальнейшего моделирования на основании данных мезомасштабных наблюдений и полученных полей инвариантных величин и динамических характеристик.

Достижение поставленной цели подразумевает решение следующих задач:

1) привлечение исходных данных, имеющих высокое пространственно-временное разрешение;

2) идентификацию зоны повышенной бароклинности и выявление её структурных особенностей;

3) получение полей инвариантной характеристики в горизонтальной и вертикальной плоскости;

4) расчет полей вертикальной составляющей вихря на разных уровнях, построение её вертикального разреза;

5) сопоставление полей расчетных характеристик для оценки трехмерной структуры движений в области повышенной бароклинности.

Материалы исследований. Как отмечалось выше, исследование мезомасштабной структуры фронтов возможно лишь на основании фактических данных, обеспечивающих высокое пространственно-временное разрешение.

В качестве таких данных использованы материалы полевой фазы эксперимента FASTEX, посвященного изучению траекторий перемещения фронтов и циклонов над Атлантикой и проводившегося в январе-феврале 1997 г. в Атлантическом океане и на территории Западной Европы. В качестве района исследования был выбран участок акватории, ограниченный 45-55° с.ш. и 30-45° з.д. Данные комплексных наблюдений включают в себя наблюдения с судовых и буйковых станций, расположенных в указанном районе, а также данные дрозондирования. Последние получены в результате прохода самолета-лаборатории через линию атмосферного фронта и сброса дрозондов вдоль N-образной траектории (рис.1). Они содержат в себе сведения о температуре воздуха, влажности, направлении и скорости ветра с дискретностью 25 м с уровня 8 км до уровня океана.

Первичная метеоинформация о температуре воздуха подвергалась контролю качества и отфильтровывалась посредством сервисной программы (среда разработки Borland Delphi 7), на предмет формирования нерегулярных данных (в формате долгота – широта – температура) по значениям температуры у поверхности океана, на уровнях

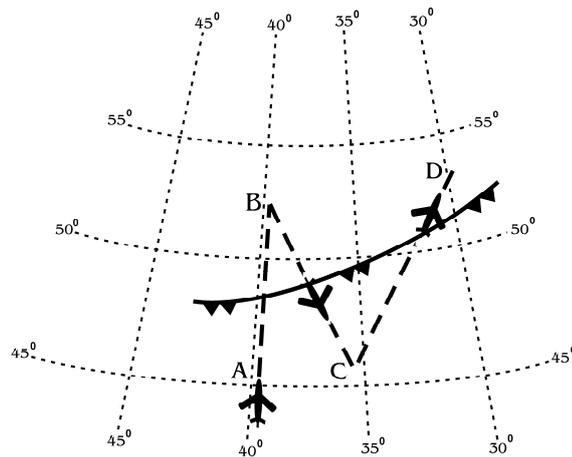


Рисунок 1 – Схема маршрута полета самолета-лаборатории относительно линии АФ во время полевой стадии эксперимента FASTEX (16-20 UTC 03/02/1997).

АТ-850 и АТ-700 гПа. Для получения значений поля температуры в узлах регулярной сетки точек нерегулярные данные в математическом пакете анализа данных MathSoft Aхum v7.0 с помощью алгоритма бивариационной интерполяции преобразованы в поля в пределах рассматриваемой территории с расчетным шагом по широте и долготу равным 0,25°.

Результаты исследований. В период эксперимента (16 - 20 UTC 03 / 02 / 1997) синоптическая обстановка по маршруту полета самолета-лаборатории обуславливалась прохождением холодного фронта с севера, связанного с циклоном, центр которого находился над Норвежским морем.

Идентификация зоны повышенной бароклинности выполнялась на основании результатов расчета числа термодинамических соленидов (ЧТС) в пределах рассматриваемой акватории с использованием методики, предложенной в [1]. Расчет производился по двум направлениям – вдоль широтных и меридиональных кругов, а

затем путем осреднения вычислялось конечное значение N . Кроме того, для зональных составляющих N вводилась поправка на сферичность Земли (умножались на $1/\cos \varphi$).

Поле ЧТС позволяет оценить величину бароклинности по рассматриваемой территории, а зоны повышенной концентрации соленидов ($N > 100$) идентифицировать как такие, что соответствуют положению фронтального раздела. Расчетное поле ЧТС (рис.2) содержит две узких зонально расположенных зоны повышенной бароклинности (число термодинамических соленидов ≈ 160), в интервале $47-50^\circ$ с.ш. и разделенных перемычкой со значением ЧТС ≈ 80 .

Строго говоря, поле ЧТС не может являться достаточным критерием идентификации фронтальных разделов, поскольку решение задачи о фронтогенезе подразумевает формирование разрыва фронтальных свойств в узкой зоне за конечный интервал времени (меньший временного интервала бароклинных волн Иди). Поэтому для корректного доказательства наличия атмосферного фронта в рассматриваемом районе существует необходимость привлечения дополнительных сведений, которые бы отражали указанный факт.

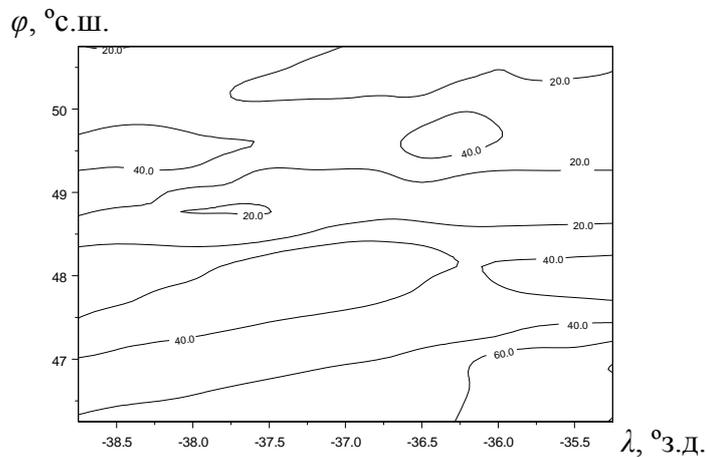


Рисунок 2 – Поле ЧТС 16-20 UTC 03 / 02 / 1997 (расчетный шаг $0,25^\circ$).

Рассмотрение уравнений движения идеальной жидкости при выполнении условия $w = 0$ позволяет получить упрощенную систему уравнений для приземного фронта [2]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} U_a - fV_a &= 0 \\ \frac{d}{dt} V + fU_a &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где U_a – поперечная относительно линии АФ агеострофическая компонента скорости;
 V_a – продольная относительно линии АФ агеострофическая компонента скорости;
 V – продольная к линии фронта компонента скорости;
 f – параметр Кориолиса.

Решения системы уравнений (1) ищутся для двух предельных случаев $V=V_g$ и $V=V_a$. Не останавливаясь на виде этих решений, которые доступны, например в [3], лишь заметим, что они воспроизводят возникновение разрыва в поле скорости за конечный интервал времени. Распределение компонент скорости u и v в зоне фронта на высотах 600 и 1000 м в рассматриваемом случае представлено на рис.3.

Видно, что поле скорости на обоих уровнях идентично и испытывает разрыв в районе 50° с.ш., что соответствует границе фронтального раздела, ранее установленной по результатам расчета поля ЧТС. В то же время, вторая точка разрыва находится за пределами выделенной области, что говорит о своеобразной «размазанности» фронтальной зоны и уточняет первоначальные выводы (сделанные из анализа поля ЧТС) о её ширине. Поскольку «удельный вес» распределения компонент скорости в вопросе идентификации зоны АФ все же является более высоким, чем поля ЧТС, то в своих дальнейших рассуждениях будем учитывать именно эти результаты.

Установив факт наличия фронтальной зоны, далее, на основании имеющихся исходных данных, получены поля потенциальной температуры для уровней 0, 200, 400, 600м (рис.4). Неоднородность распределения потенциальной температуры по горизонтали (или, что практически одно и то же, сил плавучести) обуславливает возникновение в бароклинной среде доступной потенциальной энергии.

Такое влияние на динамику течений следует из соотношений для термического ветра, которые представим в следующем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{g}{f_0 \Theta_s} \frac{\partial \theta}{\partial y}; \quad \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{g}{f_0 \Theta_s} \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

или перепишем в виде одного векторного равенства

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial z} = \frac{g}{f_0 \Theta_s} \vec{k} \times \nabla \Theta, \quad (2)$$

где Θ_s – равновесная потенциальная температура; индекс s обозначает равновесное распределение величины, описывающее состояние среды в отсутствие относительных движений;

θ – отклонение потенциальной температуры от ее равновесного значения;

f_0 – параметр Россби.

\vec{k} – единичный вертикальный орт.

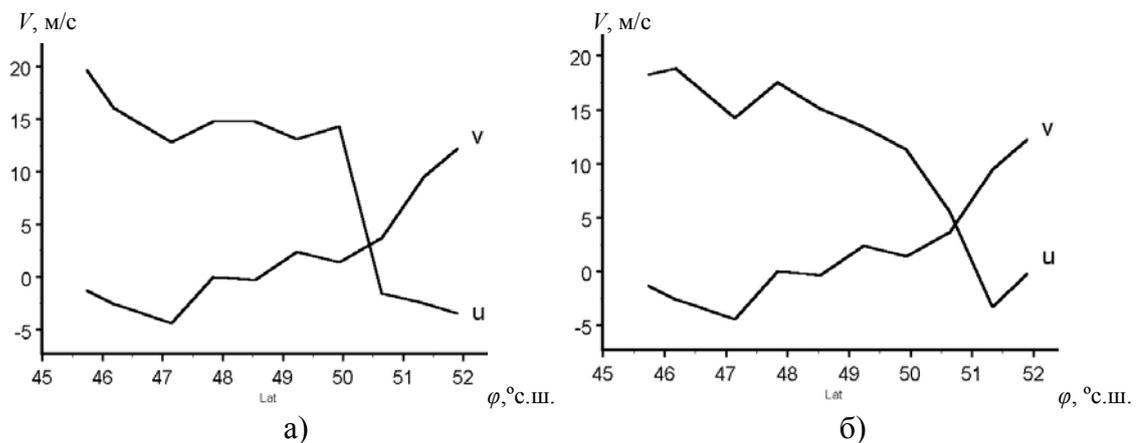


Рисунок 3 – Распределение компоненты скорости u , направленной вдоль фронта, и компоненты v , поперечной фронту, на высоте 600 м (а) и 1000 м (б) вдоль отрезка ВС траектории полета самолета (FASTEX, 17-19 UTC 03/02/1997).

В (2) отклонение θ заменено на Θ , поскольку равновесные величины зависят только от вертикальной координаты.

Согласно (2) горизонтальный градиент потенциальной температуры является причиной систематического вертикального сдвига скорости ветра и, как следствие, вызывает потерю устойчивости движений, индуцируя вихреобразование.

Анализ полей потенциальной температуры на высотах 0, 200, 400, 600 м (рис.4) показывает наличие меридионально ориентированных зон повышенных градиентов вдоль 38 и 50° з.д., что говорит о существующих здесь запасах доступной потенциальной энергии. Изолинии потенциальной температуры на вертикальном разрезе, совпадающим с участком ВС траектории полета самолета-лаборатории (рис.5), в случае адиабатичности процесса можно считать материальными поверхностями, вдоль которых происходит движение воздуха [4]. Они претерпевают характерные изгибы (заштрихованные области) именно в области зон повышенных горизонтальных градиентов потенциальной температуры ($\approx 47^\circ$ и $\approx 49^\circ$ с.ш.). Характер этих изгибов (сопряженные ложбина-гребень) свидетельствует о возможности роста малых возмущений, способных трансформироваться в вихри разных знаков.

Для выявления структуры поля завихренности по рассматриваемой области из базового (трехмерного) поля ветра (восстановленного на отдельных уровнях методом Барнса) получены поля вертикальной компоненты завихренности на уровнях от 0 до 2000 м (через 200 м). Результаты для уровней (200, 400, 600, 800 м) представлены на рис.6.

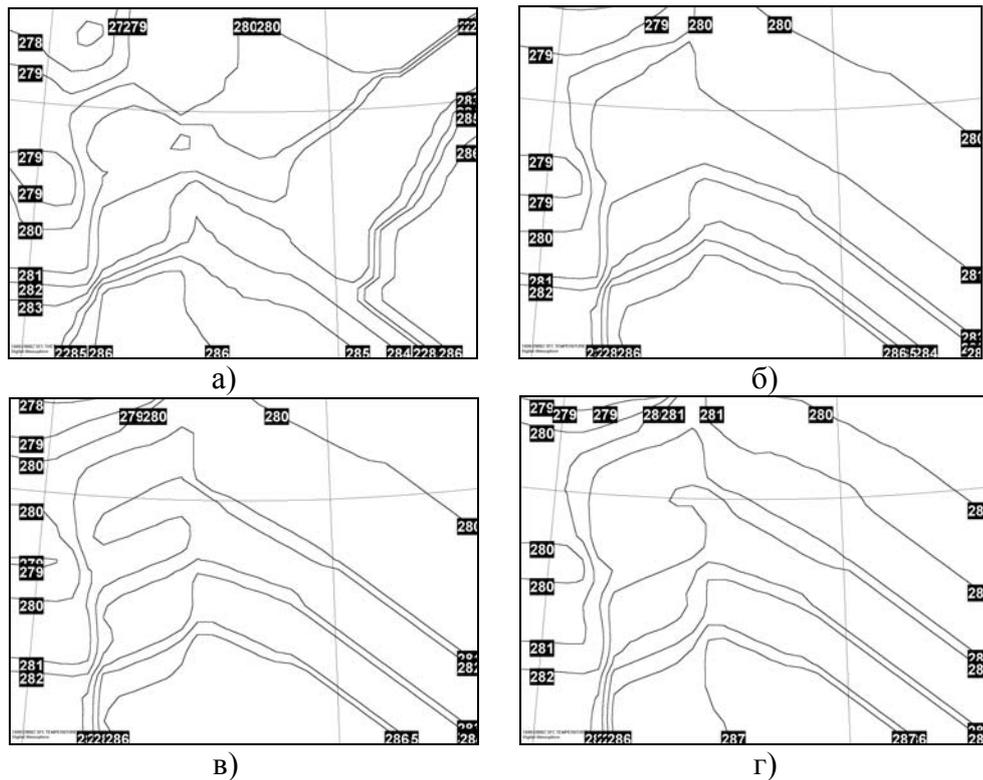


Рисунок 4 – Поле потенциальной температуры θ на высотах: а) 0 м; б) 200 м; в) 400 м; г) 600 м (координатная привязка – $\varphi \approx 44,5-52,3^\circ$ с.ш.; $\lambda \approx 40,5 - 31,5^\circ$ з.д.).

Априори зная о локализации зоны максимальной завихренности в зоне АФ [4], оценим возможность детализации её структурных особенностей в силу установленного

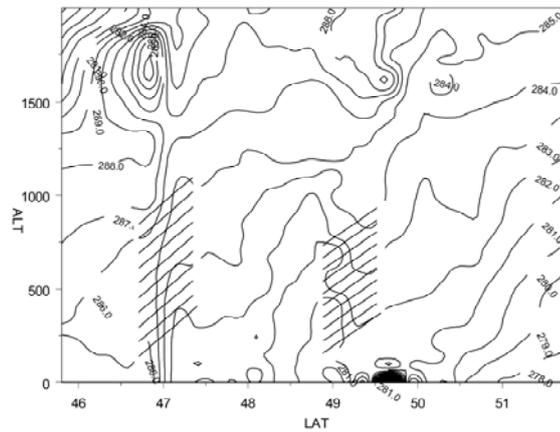


Рисунок 5 – Вертикальный разрез поля потенциальной температуры θ , соответствующий участку ВС на рис.1 (FASTEX, 17-19 UTC 03/02/1997 г.). Алгоритм Internal (Weighted Average).

Браунингом и Харролдом [5] факта формирования в зоне ХФ мезомасштабного воздушного потока, направленного к центру циклона.

Полученное поле вертикальной составляющей относительного вихря Ω_z (рис.6) демонстрирует наличие когерентных вихревых структур с пространственными размерами, находящимися в пределах β -мезомасштаба (≈ 200 км – большая ось, ≈ 40 км -

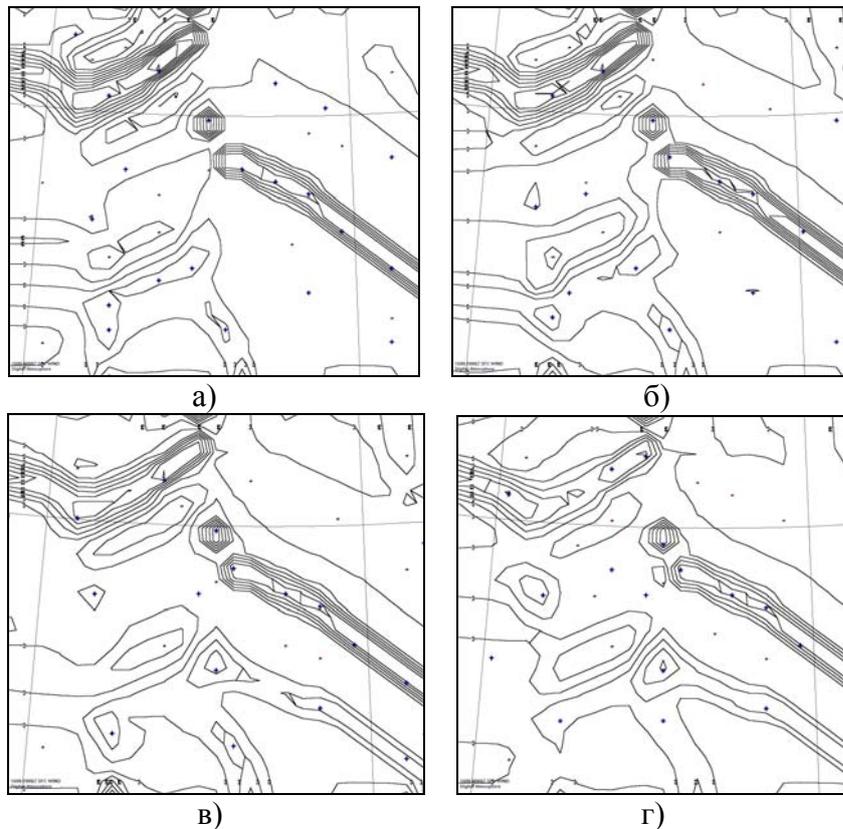


Рисунок 6 – Поле вертикальной составляющей относительного вихря Ω_z (координатная привязка совпадает с рис.4) на высотах: а) 200 м; б) 400 м; в) 600 м; г) 800 м.

малая ось) и имеющими противоположный знак ($\Omega_{z \min} = -5 \dots -10 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$; $\Omega_{z \max} = 20 \dots 25 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$). Как следует из рис.2, структурной особенностью рассматриваемой бароклинной зоны является наличие перемычки, которой соответствует ЧТС, равное 80, что разделяет её на две полосы с ЧТС, равными 160-240. Это находит отражение и в поле завихренности, которое тоже имеет два ряда парных вихревых структур вдоль 47 и 50° с.ш. При этом можно отметить интересный факт – отношение ширины вихревой дорожки к продольному расстоянию между вихрями составляет $\approx 0,5$. Для реализации же подхода, предложенного в [6] данное отношение должно составлять $\approx 0,28$ (условие существования вихревой цепочки Кармана), поэтому его использование в исследуемом случае будет необоснованным.

Сопоставление поля вихря (рис.6) с полем потенциальной температуры (рис.4) позволяет сделать вывод о локализации вихревых структур в областях повышенных (2-5 К/100км) градиентов потенциальной температуры (49 - 51° с.ш., 37 - 39° з.д. и 47 - 48° с.ш., 37 -38° з.д.), т.е. в областях, где в силу (2) и происходит потеря устойчивости движений.

Вертикальный разрез поля относительного вихря в пределах пограничного слоя атмосферы на участке ВС представлен на рис.7. Когерентным вихревым структурам на рис.6 вблизи 38 и 50°с.ш. на вертикальном разрезе соответствуют парные вихри со значениями $\Omega_{z \min} = -2 \dots -3 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$; $\Omega_{z \max} = 5 \dots 12 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$. К слову, полученные значения подтверждают известное требование к исследованиям мезомасштабных процессов – горизонтальные составляющие вихря скорости в данном диапазоне не являются пренебрежимо малыми по сравнению с его вертикальной составляющей [4]. При этом

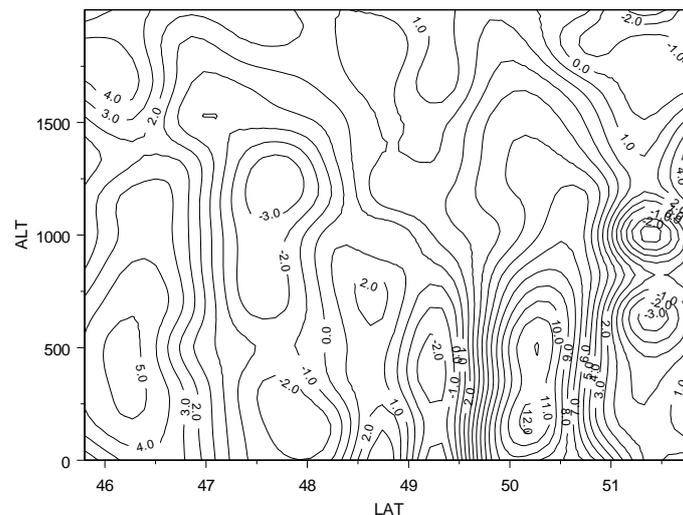


Рисунок 7 – Вертикальный разрез относительного вихря (FASTEX, 17-19 UTC 03/02/1997 г.) Алгоритм Internal (шаг по вертикали составляет 250 м, используются данные дрозондирования и точек с координатами 46, 47, 48, 49, 50, 51° с.ш.).

более интенсивным вихрям на горизонтальных уровнях соответствуют более интенсивные вихревые пары на вертикальном разрезе. Значительной разности между вертикальной протяженностью вихрей на вышеуказанных широтах не наблюдается – вихревые движения распространяются практически на весь пограничный слой. Характерной особенностью является лишь то, что в области 50° с.ш. положительная завихренность прослеживается до высоты 1700-1800 м, отрицательная – до высоты 1000-1200 м, а в области 38° с.ш. – наоборот, но вести речь о значимости этой разницы на основании одного случая не приходится.

Сопоставление полей потенциальной температуры θ и вертикальной составляющей относительного вихря Ω_z по линии вертикального разреза ВС (рис.5, 7) дает основания утверждать, что расположение заштрихованных областей совпадает с районами формирования «несущих полос» в пределах бароклининой зоны, что обязательно должно приниматься во внимание при моделировании подобных процессов.

Выводы и перспективы дальнейших исследований.

1) Расчет поля ЧТС в сочетании с данными распределения компоненты скорости u , направленной вдоль линии фронта, и компоненты v , поперечной фронту, позволяет идентифицировать зону повышенной бароклинности, её интенсивность и ширину;

2) локализация областей повышенных градиентов в горизонтальном и вертикальном распределении потенциальной температуры совпадает с локализацией зон генерации вихревых структур;

3) структура полученного на основании мезомасштабных данных дрозондирования (о направлении и скорости ветра) поля завихренности в зоне повышенной бароклинности содержит парные вихревые структуры противоположных знаков.

4) горизонтальные размеры когерентных вихревых структур находятся в диапазоне β -мезомасштаба и имеют значения вертикальной составляющей вихря скорости $\Omega_{z \min} = -5 \dots -10 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$; $\Omega_{z \max} = 20 \dots 25 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ при степени бароклинности (выраженной в ЧТС) рассматриваемой зоны 160-240.

Во второй части данной работы на основании установленных параметров вихревых структур (продольные и поперечные размеры вихрей, период, ширина вихревой дорожки) районов их генерации, зависимости величины вертикальной составляющей относительного вихря от интенсивности зоны повышенной бароклинности будет предпринята попытка моделирования переноса воздуха (в плоском приближении) в области АФ. Для этого будут использованы, помимо вышеизложенных данных, уже имеющиеся результаты [7] (с некоторыми коррективами), а также данные расчетов, которые являются результатами уже существующих альтернативных методик.

Список литературы

1. Грушевский О.Н., Ешану А.Е. Объективный анализ интенсивности мезомасштабных вихревых структур в зоне атмосферных фронтов // Матеріали VII наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ 18 - 20 травня 2006 р. - С. 22-23.
2. Динамика погоды. Под редакцией С.Манабе. – Л.: Гидрометиздат, 1988. – 420 с.
3. Witman G.B. Linear and Non Linear Waves. – Wiley, New York, 1974. – p 275.
4. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов – Л.: Гидрометиздат, 1985 – 263с.
5. Browning K.A., Harrold T.W. Air motion and precipitation growth in a wave depression. // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. – 1969. – v.95, N 404. – p. 288-309.

6. Ефимов В.А., Петерсон В.Б. Модель фронтогенеза на основе вихревых цепочек Кармана // Метеорология, климатология и гидрология.- 1995.- Вып.32.- С. 102-107.

7. Грушевський О.М. Мезоструктура поля вітру у зонах атмосферних фронтів: просторово-часові особливості та спрощені прийоми моделювання // Вісник Одеського державного екологічного університету, 2007.- Вип.4.- С. 114-119.

Тривимірна структура повітряних потоків в області α - мезомасштабних бароклінічних зон – експериментальні дослідження руху і його моделювання методом дискретних вихорів.
Івус Г.П., Грушевський О.М., Єшану О.Є.

(I частина)

Полеві спостереження і мезомасштабний аналіз структури поля завихреності атмосферного фронту.

На підставі даних дропзондування розглядається структура поля завихреності фронтальної зони в межах граничного шару атмосфери. На рівні якісної згоди показано, що характер ізентропічного руху в горизонтальній і вертикальній площинах відображає особливості кінематичної структури поля швидкості в області атмосферного фронту.

Ключові слова: мезомасштабні дані, поле відносного вихору, вертикальні розрізи полів потенціальної температури і завихреності.

Three-dimensional structure of air streams within meso- α baroclinic zones – experimental research of motion and its modeling by the method of discrete vortices. G.P.Ivus, O.N.Hrushevsky, A.Ye. Yeshanu.
(part I)

In-situ observations and mesoscale analysis on the structure of vorticity related to an atmospheric front.
Based on dropsounding data, structure of a vortex field within a frontal zone belonging to the atmospheric boundary layer is considered. It is shown on the level of quality consent that the character of isentropic motion in the horizontal and vertical planes reflects the specialties of cinematic structure of the wind field within an atmospheric front.

Keywords: mesoscale data, field of relative vorticity within a frontal zone, vertical cross-sections of the fields of potential temperature and vorticity.