

И.Г. Семёнова, Г.П. Ивус

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ФРОНТАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БАРОКЛИННЫХ ЗОН В ПРОЦЕССАХ ЦИКЛОГЕНЕЗА**

Термический фронтальный параметр был исследован для моделирования фронтальных бароклинных зон в циклонах над Европой. Этот параметр вычислялся для разных слоев тропосферы и у поверхности Земли с использованием данных различного разрешения. Получено хорошее согласование смоделированных фронтальных зон и положения приземных фронтов.

**Ключевые слова:** термический фронтальный параметр (ТФП), атмосферный фронт, циклон, бароклинная зона, облачность.

### **Вступление**

Фронтологический анализ является важнейшим этапом обработки метеорологической информации синоптиком, который в значительной степени опирается на свой опыт и представление о положении и характере атмосферных фронтов и тем самым вносит определенный отпечаток субъективизма. Фронты проводят на основе их определения как зон раздела разных воздушных масс, с учетом структуры барического и термического полей, характера адвекции температуры, осадков и т.д., но единых количественных способов учета всех факторов до сих пор не существует.

Объективный анализ атмосферных фронтов осуществляется на базе количественного учета особенностей полей метеорологических величин в области фронта. В качестве количественных характеристик в практике мировых метеорологических центров используют фронтальные параметры, которые, в первую очередь, включают в себя горизонтальный градиент температуры, учитывают структуру полей геопотенциала, влажности, осадков, тип синоптической ситуации и др. [2-6].

Термический фронтальный параметр (ТФП) благодаря своей универсальности может быть применен для оценки бароклинности атмосферных процессов различных пространственно-временных масштабов. Так, использование среднемесячных полей температуры

позволяет выделить в рассчитанных полях ТФП бароклинные зоны, соответствующие участкам климатологических фронтов в зимний период в Атлантико-Европейском секторе и проследить их динамику в зимний период [1]. В реальных синоптических процессах зоны положительных значений ТФП в средней тропосфере указывают наиболее интенсивные участки высотных фронтальных зон, которые могут быть интерпретированы в приземные линии атмосферных фронтов при наличии благоприятного барического поля.

Данная работа посвящена исследованию структуры бароклинных зон и приземных фронтов в циклонах различных типов над Европой с использованием термического фронтального параметра.

### **Исходные материалы и методы исследования**

Термический фронтальный параметр является простейшей количественной характеристикой, используемой для объективного анализа атмосферных фронтов, и математически описывается следующим выражением [5, 7]:

$$TFP = -\nabla|\nabla T| \frac{\nabla T}{|\nabla T|}, \quad (1)$$

где  $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y}$ ;

$|\nabla T| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$  – модуль горизонтального градиента температуры.

Термический фронтальный параметр соответствует основному определению атмосферного фронта, а именно, на холодном фронте температура начинает падать, а на теплом фронте наблюдается окончание повышения температуры.

Расчет ТФП может быть проведен на любом уровне атмосферы с использованием поля температуры, а также для некоторых слоёв, что позволяет учесть трехмерность фронтальных зон. Для учета влагосодержания может быть использована эквивалентная температура  $T_e$ :

$$T_e \cong T + 2,5q,$$

где  $q$  – удельная влажность ( $\text{г} \cdot \text{кг}^{-1}$ ).

Рассчитанные поля термического фронтального параметра имеют вид полос, которые расположены преимущественно в областях

пониженного давления. Положение линии фронта ассоциируется с зоной повышенных градиентов температуры с теплой стороны высотной фронтальной зоны, где скорость изменения градиента температуры максимальна. Фронтальный раздел проводят по максимальным положительным значениям ТФП, отрицательные значения не используются.

Поле термического фронтального параметра также хорошо согласовывается с облачными полями на спутниковых снимках. А именно, зоны положительных значений ТФП, особенно с учетом влажности воздуха, совпадают с самыми яркими участками фронтальной облачности на снимках.

В реальных синоптических процессах представляет интерес объективное выявление зон атмосферных фронтов в циклонах, при этом значения ТФП могут отражать интенсивность фронтогенеза и циклогенеза.

В качестве исходной информации взяты данные реанализа полей метеорологических величин NCEP-NCAR CDAS-1 – температура (К), удельная влажность ( $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$ ) на уровнях 925, 850, 700 та 500 гПа с шагом сетки 2,5 градуса. Поля ТФП имеют размерность ( $10^{-11} \div 10^{-13}$ )  $\text{К}\cdot\text{м}^{-2}$ , а в дальнейшем анализе применяются единицы ТФП (без указания показателя степени). Также использованы приземные данные тех же метеорологических величин с шагом сетки 30 км, полученные по модели WRF, которая реализована в УкрНИГМИ.

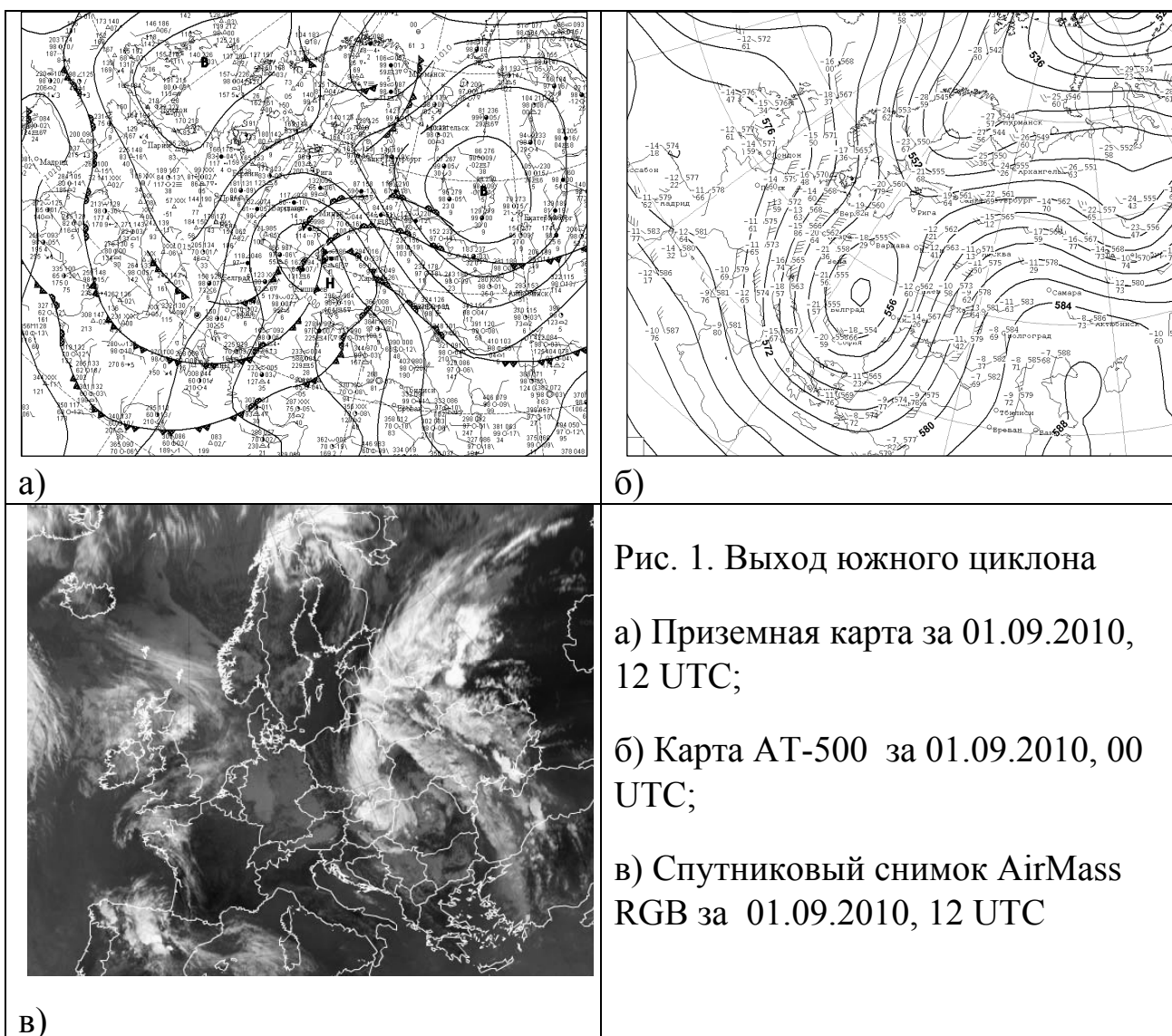
### **Результаты исследования и их анализ**

В практической синоптике одной из задач является определение положения фронтального раздела в циклонах, поэтому в данной работе изучены поля тропосферного термического фронтального параметра в разных процессах циклогенеза в умеренных широтах. Исследование свойств тропосферного термического фронтального параметра с учетом влажности позволило выявить слои тропосферы, в которых расчет ТФП наиболее эффективен для поставленной задачи.

### ***Выход южного циклона 31.08-01.09.2010 г.***

Циклон образовался на волне холодного фронта 31 августа 2010 г. над районами Румынии. На протяжении суток он перемещался в северо-восточном направлении к западным районам Украины. 1 сентября 2010 г. циклон достиг стадии максимального развития с минимальным

давлением 998,6 гПа и двойной системой активных атмосферных фронтов, которая начала окклюдироваться (рис. 1, а).



Дальнейшее углубление и перемещение циклона к северу было ограничено за счет интенсивного роста высотного гребня впереди по потоку (рис. 1, б). В области циклона и атмосферных фронтов наблюдалась мощная облачность, выпадение ливневых осадков, грозы, усиления ветра (рис. 1, в).

Рассмотрим рассчитанные поля термического фронтального параметра с учетом влажности в разных слоях.

На рис. 2 представлено поле ТФП в нижнем слое тропосферы 925-850 гПа, фронтальная зона в котором может быть согласована с

положением приземной линии фронта. Также приведено осредненное поле конвективной облачности нижнего яруса (степень покрытия в %).

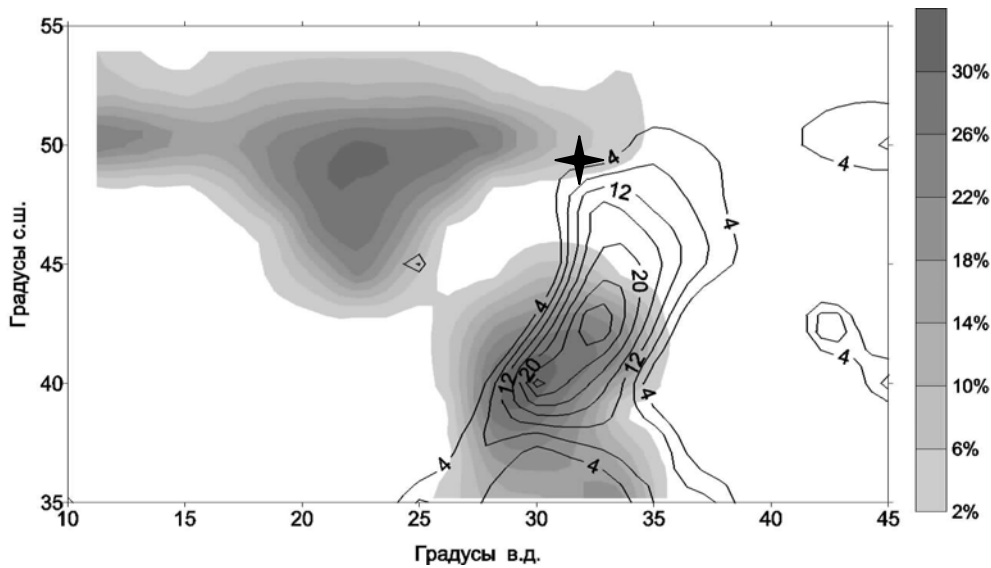


Рис. 2. Поле ТФП в слое 925-850 гПа и поле конвективной облачности нижнего яруса (%) (+здесь и далее – приземный центр циклона)

Можно видеть, что максимум ТФП расположен в области циклона и соответствует участкам холодного фронта и зоне наибольшей плотности конвективной облачности. Теплый фронт в циклоне выражен слабее. Южнее 40° с. ш. наблюдается раздвоение зоны на две ветви приблизительно одинаковой интенсивности, что свидетельствует о двойной системе атмосферных фронтов, которые отдаляются друг от друга на периферии циклона. В теплом секторе циклона выделяется еще одна зона ТФП, которая может соответствовать старой окклюзированной системе в области термического гребня. В тыловой части циклона, несмотря на непрерывное поле конвективной облачности, градиенты температуры невелики, что говорит об однородности поля температуры в холодной воздушной массе и отсутствии вторичных фронтов, а также слабых градиентах в области фронта окклюзии.

Слой тропосферы 850-700 гПа (рис. 3) отличается интенсивной адвекцией температуры, но здесь атмосферный фронт уже превращается в достаточно широкую зону, которая существенно отличается по своему положению в пространстве от положения линии фронта у поверхности Земли. В поле ТФП можно видеть некоторые отличия в сравнении с ниже расположенным слоем. Градиенты ТФП с высотой уменьшились, поэтому для лучшего описания фронтальной зоны взята изолиния в две единицы. Не наблюдается двойная структура холодного фронта, однако зона

повышенных значений ТФП в теплом секторе хорошо выражена, что подтверждает вывод о наличии верхнего фронта окклюзии. Как и в нижнем слое, максимальное количество конвективной облачности в зоне холодного фронта располагается в районе  $40^\circ$  с. ш., что в соответствии с максимумом ТФП указывает на наличие фронтальной волны над юго-западом Черного моря.

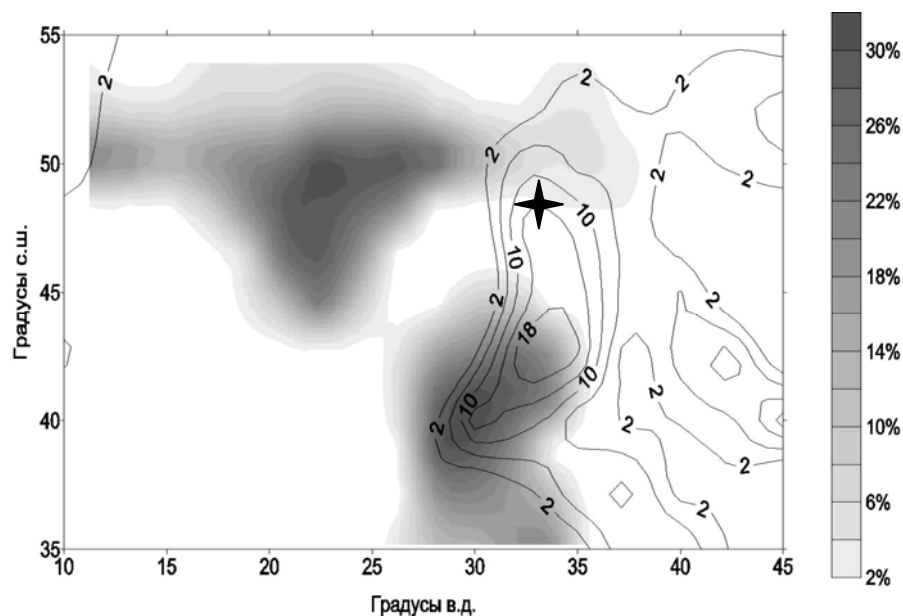


Рис. 3. Поле ТФП в слое 850-700 гПа и поле конвективной облачности среднего яруса (%)

Поле ТФП в слое 850-500 гПа наиболее гладкое и сохраняет черты предыдущих полей (рис. 4).

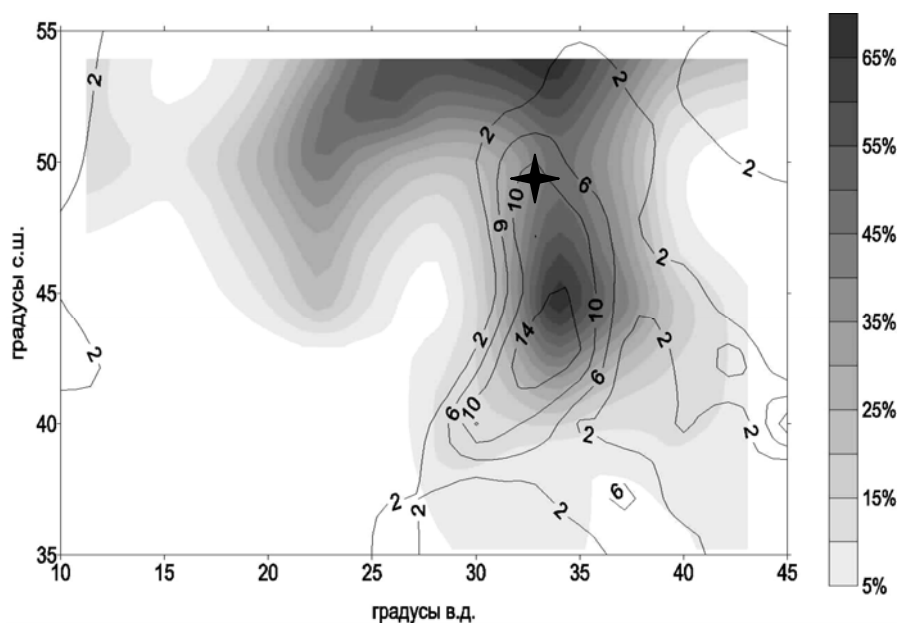
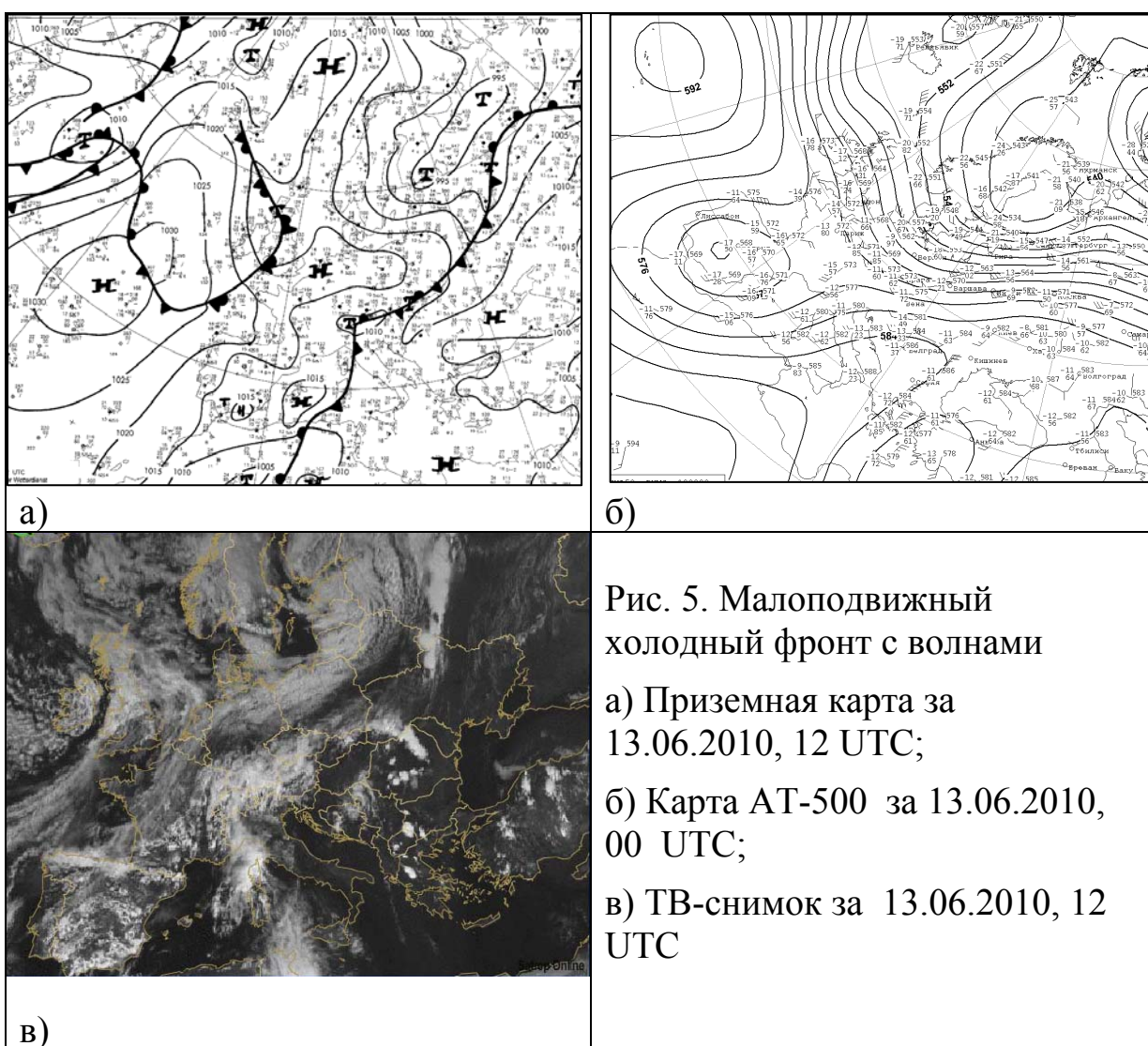


Рис. 4. Поле ТФП в слое 850-500 гПа и поле общей облачности среднего яруса (%)

При этом наибольшее количество общей облачности практически совпадает с максимумом ТФП в глубокой ложбине циклона, а вся фронтальная система располагается в поле облачности, за исключением фронта окклюзии, который в этом слое также не выявляется.

**Фронтогенез на малоподвижном холодном фронте 13.06.2010 г.**

Погодные условия 13 июня 2010 г. над Центральной Европой определялись активным атмосферным фронтом, который занимал квазиширотное положение между двумя полями повышенного давления и находился под интенсивной высотной фронтальной зоной умеренных широт (рис. 5 а, б).



**Рис. 5. Малоподвижный холодный фронт с волнами**  
 а) Приземная карта за 13.06.2010, 12 UTC;  
 б) Карта АТ-500 за 13.06.2010, 00 UTC;  
 в) ТВ-снимок за 13.06.2010, 12 UTC

На спутниковом снимке атмосферный фронт хорошо выражен в поле облачности. Участки холодного фронта состоят из смешанной слоистой и кучево-дождевой облачности, которая особенно плотная в

области фронтальной волны над районом Альп. В южной половине Европы, над Карпатами можно видеть повсеместное развитие конвективных очагов в теплом, влажном, неустойчивом воздухе.

Для данного случая рассмотрим рассчитанные поля термического фронтального параметра в слое 925-850 гПа и 850-700 гПа.

В нижнем слое тропосферы фронтальный раздел четко выражен в слое ТФП, максимумы наблюдаются возле фронтальных волн (рис. 6). Северная граница фронтальной зоны четкая, к югу отмечаются относительно узкие максимумы ТФП, которые соответствуют участку холодного фронта на западе области, зоне неустойчивости в районе Карпат, а также переходной зоне повышенных градиентов температуры между относительно холодной воздушной массой над Черным морем и прогретым воздухом над юго-востоком Европейской территории России.

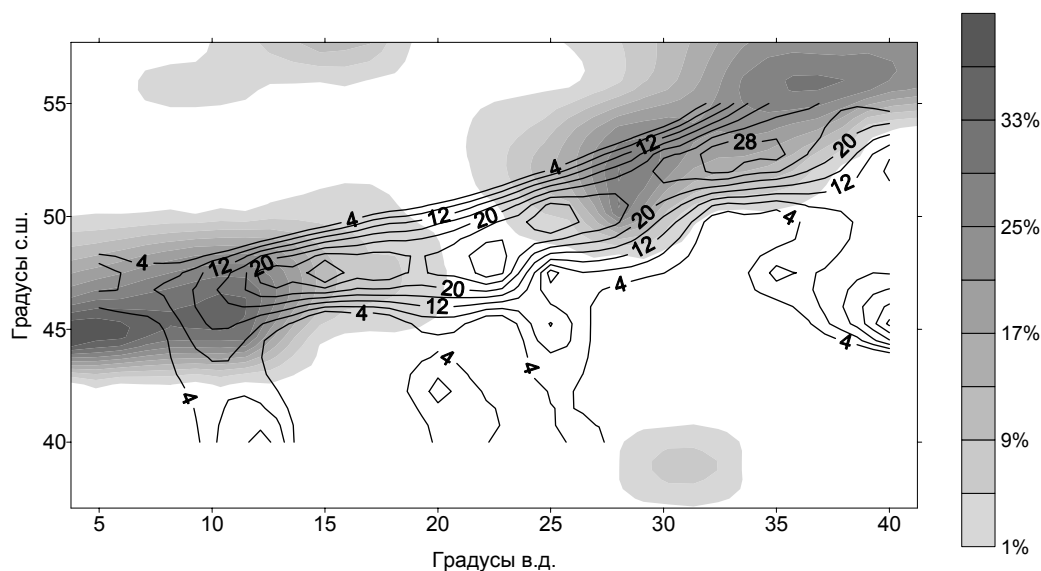


Рис. 6. Поле ТФП в слое 925-850 гПа и поле конвективной облачности нижнего яруса за 13.06.2010 г.

В слое 850-700 гПа поле ТФП более гладкое, с меньшими градиентами (рис. 7).

Максимальные значения ТФП также расположены в зоне основного фронта, вторичные максимумы выражены значительно слабее, чем в нижнем слое, что свидетельствует об их связи с приземными конвергентными зонами.



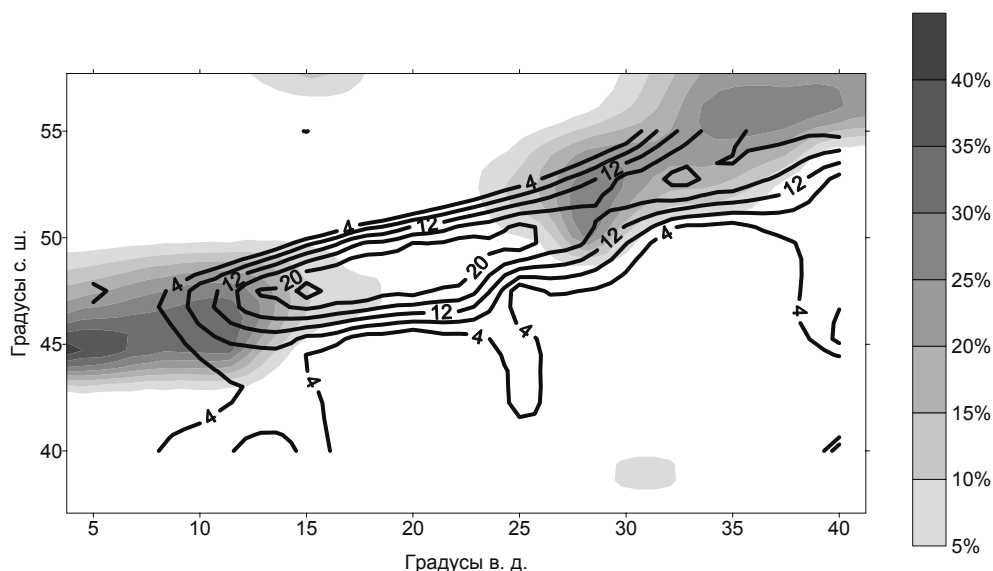


Рис. 7. Поле ТФП в слое 850-700 гПа и поле конвективной облачности среднего яруса за 13.06.2010 г.

Сравнение полей ТФП с полями конвективной облачности нижнего и среднего яруса показывает, что существует хорошее согласование положения фронтального раздела с зонами значительного количества конвективных облаков в рассматриваемых слоях. Однако, развитие конвекции в зоне фронта неоднородное. Максимальное количество облачности наблюдается на участках холодного фронта и в зоне фронтальной волны, но облачность отсутствует в зонах смены знака фронта, несмотря на значительные градиенты температуры.

#### ***Перемещение северо-западного циклона 09.04.2007 г.***

Северо-западный (ныряющий) циклон образовался у точки окклюзии над Норвежским морем 8 апреля 2007 г., в течение суток стал самостоятельным барическим образованием и начал смещаться вдоль интенсивной высотной фронтальной зоны к юго-востоку, углубляясь по пути (рис. 8).

Несмотря на небольшие размеры циклона у поверхности Земли, в поле облачности на спутниковых снимках циклон имел классическую форму для ныряющих циклонов – компактный сплошной массив слоистообразной и перистообразной облачности без ярко выраженной вихревой структуры, вытянутый в направлении ведущего потока. Облачная полоса теплого фронта не прослеживалась, так как наблюдался облачный щит теплого фронта.

Проанализируем рассчитанные поля ТФП в слоях 850-700 и 925-700 гПа. Для согласования с полем облачности использованы данные об общей облачности среднего яруса, так как в ныряющих циклонах преобладает слоистообразная облачность, а конвекция развита слабо.

В слое атмосферы 850-700 гПа фронтальный раздел четко выражен в поле термического фронтального параметра в виде непрерывной зоны повышенных значений (рис. 9). Основной максимум ТФП связан с циклоном и вершиной волны, где выделяется наиболее яркая облачность на спутниковом снимке.

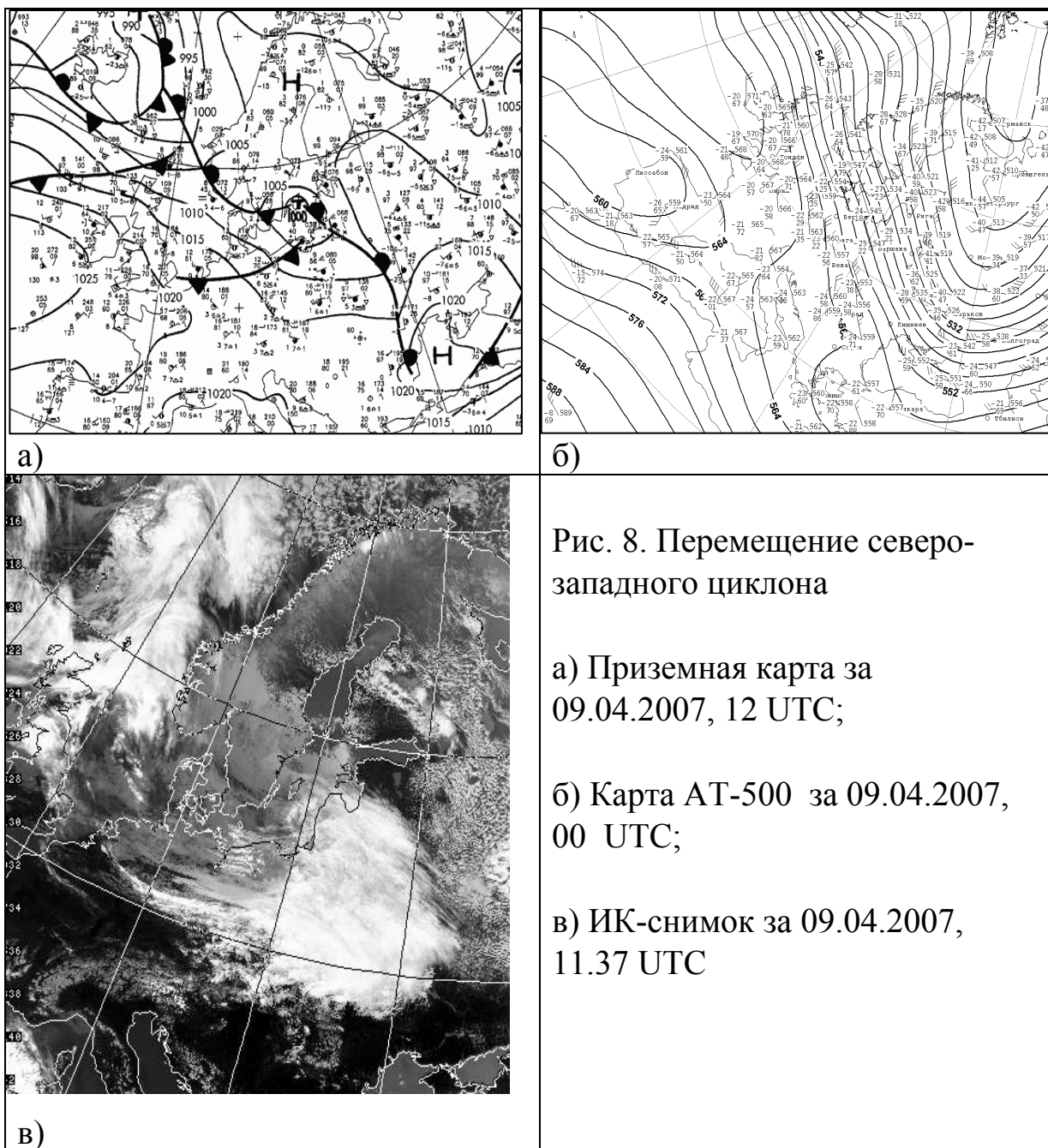


Рис. 8. Перемещение северо-западного циклона

а) Приземная карта за 09.04.2007, 12 UTC;

б) Карта АТ-500 за 09.04.2007, 00 UTC;

в) ИК-снимок за 09.04.2007, 11.37 UTC

Можно видеть, что в области циклона наибольшее количество облачности наблюдается впереди максимума ТФП, что свидетельствует о наличии плотной многослойной облачности, которая расположена над фронтальной поверхностью теплого фронта. Вторичный максимум ТФП к западу от циклона также совпадает с зоной фронтальной облачности на южной периферии циклона над Атлантикой.

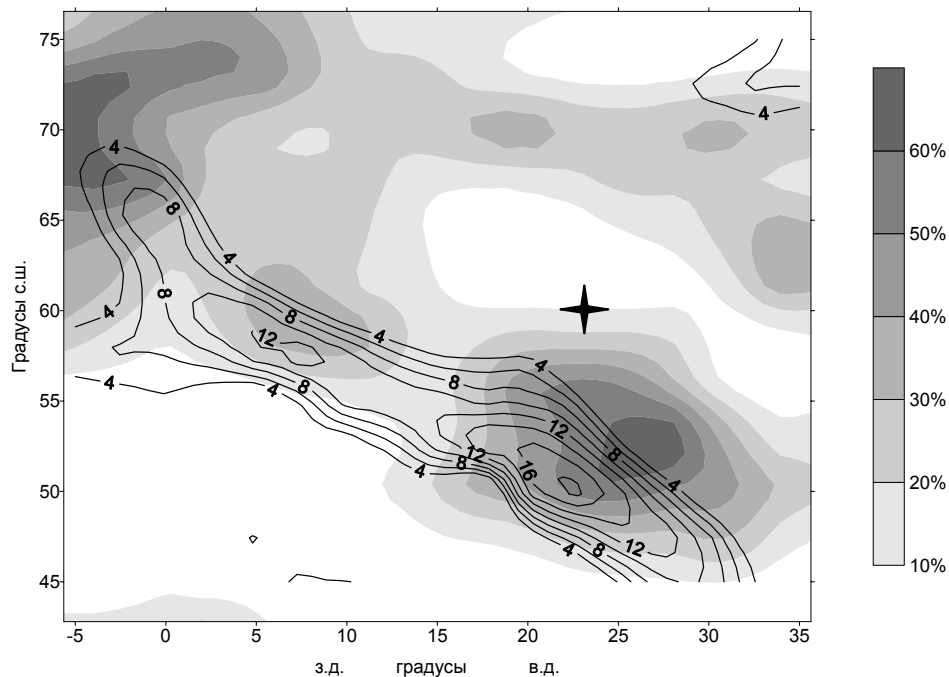


Рис. 9. Поле ТФП в слое 850-700 гПа и поле общей облачности среднего яруса за 09.04.2007 г.

Структура поля термического фронтального параметра в слое 925-850 гПа аналогична предыдущему, однако есть некоторые отличительные моменты, которые появляются с учетом процессов самых нижних слоев тропосферы (рис.10). Градиенты поля ТФП в зоне основного фронта несколько меньше, чем в вышележащем слое. Зона наиболее плотной облачности в области циклона лежит впереди по потоку от максимума ТФП, причем расстояния больше, чем для слоя 850-700 гПа, то есть наблюдается сильный наклон фронтальной поверхности теплого фронта в сторону холодной воздушной массы. В северной части области расчета выделяется еще одна зона ТФП, совпадающая с участками облачности, которая соответствует бароклинной зоне в области арктического фронта, проявляющегося на границе раздела суша-море (Скандинавский полуостров – Баренцево море). Данный фронтальный раздел в средней

тропосфере практически не прослеживается, как видно из рис. 9, то есть относится к приземным фронтам.

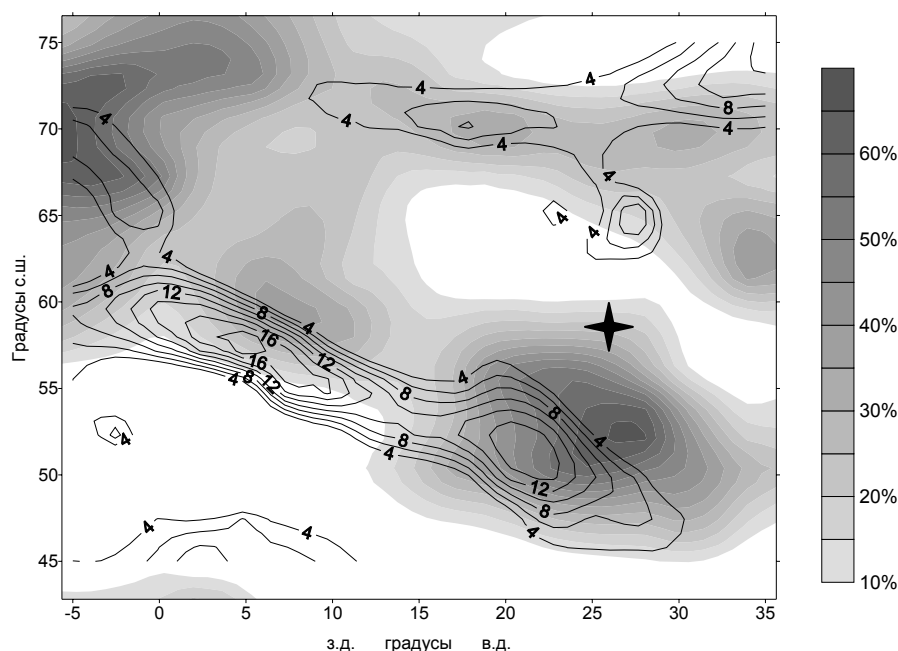


Рис. 10. Поле ТФП в слое 925-850 гПа и поле общей облачности среднего яруса за 09.04. 2007 г.

### ***Фронтологический анализ по данным модели WRF***

Для моделирования приземного термического фронтального параметра взяты поля температуры воздуха, полученные по модели WRF (Weather Research and Forecasting), версия 2-2-1, с шагом сетки 30 км (разработка УкрНИГМИ). Поскольку поле температуры у поверхности Земли очень сложное и зоны повышенных градиентов температуры не всегда являются зонами атмосферных фронтов, термический фронтальный параметр рассчитывался по формуле (1), а также с использованием модельного поля облачности. При этом был введен *комплексный* термический фронтальный параметр с использованием данных об облачности:

$$\text{ТФП}_k = k \cdot \text{ТФП}, \quad (2)$$

где  $k = (N_n + N_c + N_v)$ ;  $N_n$ ,  $N_c$ ,  $N_v$  – количество облачности соответственно нижнего, среднего и верхнего ярусов в долях единицы.

Рассмотрим результаты численного моделирования холодного фронта, проходившего через территорию Украины 6 сентября 2009 г. (рис. 11). Холодный фронт хорошо выражен в поле облачности,

наибольшая ширина и плотность фронтальной облачности наблюдалась к северо-западу от Черного моря, в зоне фронтальной волны.

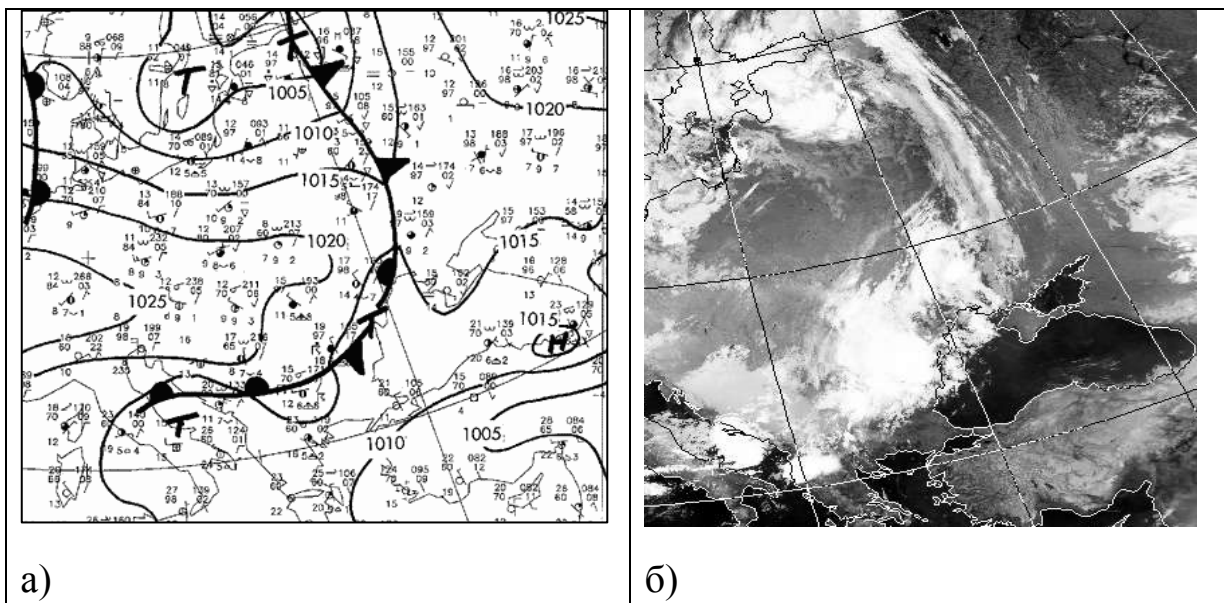


Рис. 11. Холодный фронт над Украиной, 06.09.2009 г.  
 а) Приземная карта, 00 UTC; б) ИК-снимок, 00.48 UTC

На рис. 12 приведены поля термического фронтального параметра с учетом количества облачности (комплексный ТФП<sub>к</sub>) и без него. Можно видеть, что поле ТФП, полученное только по полю приземной температуры, очень сложное (рис. 12, а). Несмотря на то, что рассматриваемый холодный фронт хорошо очерчивается узкой зоной максимальных значений ТФП, области повышенных градиентов связаны не только с фронтом, но и особенностями подстилающей поверхности, которые порождают конвергентные зоны. Особенно это хорошо прослеживается в Кавказском регионе и на восточном побережье Адриатического моря, где можно говорить о наличии мнимых фронтов.

Анализ комплексного термического параметра показывает, что учет облачности вносит положительный вклад в уточнение положения фронтальных разделов и их интенсивности, поскольку косвенным образом включаются влажность воздуха и конденсационные процессы в зонах атмосферных фронтов (рис. 12, б). Полученное поле более гладкое, основные максимумы ТФП связаны с холодным фронтом, а также участком теплого фронта в северо-западной части расчетной области.

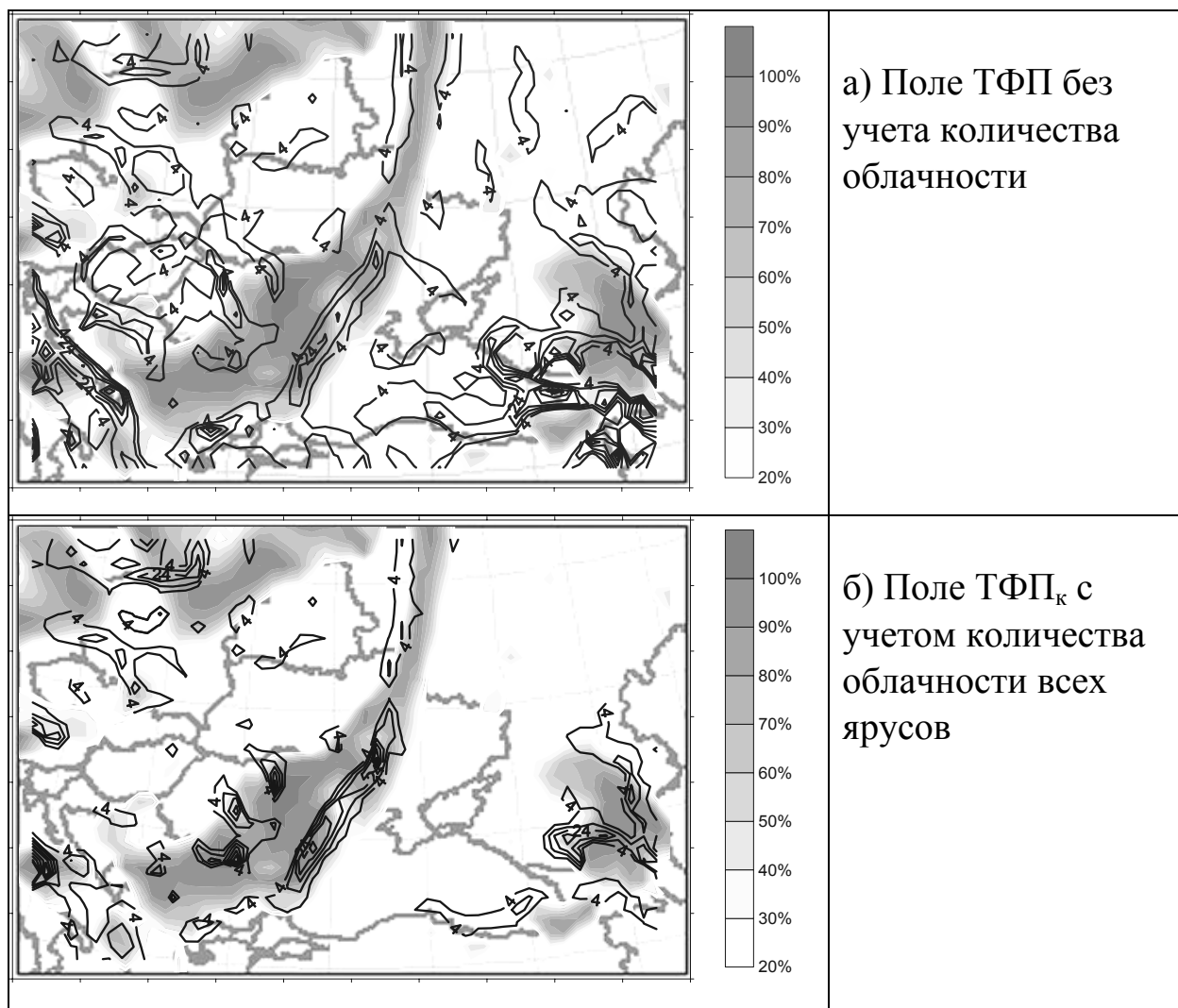


Рис. 12. Поля ТФП и облачности среднего яруса за 06.09.2009 г., 00 UTC

Зоны ТФП за холодным фронтом могут быть обусловлены как влиянием Карпат, так и наличием вторичных холодных фронтов в неоднородной воздушной массе.

Сравнение с полем облачности среднего яруса показывает хорошее согласование обоих полей, тогда как в предыдущем случае зоны повышенных значений ТФП наблюдались и в малооблачном пространстве барического гребня (см. рис. 11, а), распространяющегося с запада за холодным фронтом, где фронтальные разделы у поверхности Земли должны отсутствовать. Значительно уменьшаются и области мнимых фронтов, однако оставшиеся зоны повышенных значений ТФП удовлетворительно согласуются с облачностью, особенно конвективного характера (над Кавказом), поэтому могут приниматься во внимание как мезомасштабные конвергентные зоны неустойчивости.

Численные эксперименты, проведенные на других случаях атмосферных фронтов, показали, что использование всех трех ярусов облачности оправдано в теплый период года, в холодное полугодие можно ограничиваться облачностью среднего и верхнего ярусов для получения четкой картины распределения ТФП во фронтальных зонах.

### **Выводы**

Анализ результатов численных экспериментов с термическим фронтальным параметром в циклонах умеренных широт показал, что наилучшим образом положение линий атмосферных фронтов соответствует зонам ТФП с учетом влажности в слоях 850-700 или 850-500 гПа. Термический фронтальный параметр в слое 925-850 гПа, а также рассчитанный с использованием приземной температуры, хорошо отражает наличие приземных (вторичных) атмосферных фронтов, мезомасштабных конвергентных линий неустойчивости. Его также можно использовать для уточнения двойной структуры фронта.

\* \*

1. *Семенова И.Г.* Об'єктивний аналіз кліматологічних фронтів в Атлантико-Європейському секторі // Причорноморський екологічний бюлетень. – 2010. – № 2 (36). – С. 47-51.
2. *Хоменко Г.В.* Оценка эффективности объективного анализа атмосферных фронтов // Метеорология, климатология и гидрология. – 2008. – Вып. 50. – Ч. I. – С. 124-129.
3. *Шакина Н.П., Калугина Г.Ю., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Субъективный и объективный анализы атмосферных фронтов. I. Объективные характеристики фронтов, проведенных синоптиками // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 7. – С. 19-30.
4. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Калугина Г.Ю.* Субъективный и объективный анализы атмосферных фронтов. II. Объективное выделение зон фронтов // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 8. – С. 5-15.
5. *Creswick W.S.* Experiments in objective frontal contour analysis // J. Appl. Meteor. – 1967. – V. 6. – P. 774-781.
6. *Huber-Pock F., Kress Ch.* An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products // Meteorol. Atmos. Phys. – 1989. – Vol. 40. – N. 2. – P. 170-180.

7. Serreze M.C., Lynch A.H., Clark M.P. The arctic frontal zone as seen in the NCEP-NCAR reanalysis // J. Climate. – 2001. – V. 14. – P. 1550-1567.

*Одесский государственный экологический университет*

**I.G. Semenova, G.P. Ivus**

**Використання термічного фронтального параметру для моделювання бароклічних зон в процесах циклогенезу**

*Термічний фронтальний параметр було досліджено для моделювання фронтальних бароклічних зон у циклонах над Європою. Цей параметр обчислено для деяких шарів тропосфери та біля поверхні Землі з використанням даних різної роздільної здатності. Отримано задовільне узгодження модельованих фронтальних зон із розміщенням приземних фронтів.*

**Ключові слова:** термічний фронтальний параметр (ТФП), атмосферний фронт, циклон, бароклічна зона, хмарність.

**I.G. Semenova, G.P. Ivus**

**Use of thermal front parameter for modeling of baroclinic zones in processes of cyclogenesis**

*The thermal frontal parameter is studied to simulate frontal baroclinic zones within the cyclones over Europe. This parameter is calculated between some layers in the troposphere and surface level using different model resolution. Good accordance of simulated frontal areas with surface frontal analysis is reached.*

**Keywords:** thermal frontal parameter, atmospheric front, cyclone, baroclinic zone, cloudiness.