

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ФРОНТОГЕНЕЗУ І СИЛЬНИХ ОПАДІВ

Представлено огляд наукових робіт, які виконані в Російському ГМЦ в останні роки. В цих роботах шляхом чисельних експериментів з різними прогностичними моделями досліджується зв'язок між кількісними характеристиками атмосферних фронтів і опадами. Запропоновано методи прогнозу опадів, які не потребують урахування вертикальних рухів і сконденсованої вологи. Розглянута синоптична ситуація з сильними опадами для оцінки зв'язку останніх з інтенсивністю атмосферних фронтів.

Ключові слова: атмосферний фронт, фронтальний параметр, опади, прогностична модель.

Вступ. Сучасні гідродинамічні моделі з досить високою точністю прогнозують поля метеорологічних величин, але проблема недостатньої точності прогнозу ряду атмосферних явищ залишається нерозв'язаною. Перш за все це відноситься до прогнозу опадів. Відомо, що навіть в найкращих гідродинамічних моделях прогноз опадів, особливо інтенсивних, недостатньо успішний.

Чисельний прогноз опадів є складною задачею, тому що модель повинна урахувати, з одного боку, механізми фазових переходів вологи, хмаро- і опадоутворення, а з другого – механізми генерації вертикальних рухів, роль яких не можна недооцінювати.

В роботах [1-4] показано, що існує тісний статистичний зв'язок між наявністю та інтенсивністю опадів, що спостерігаються, і діагностичними характеристиками процесів, які спричиняють виникнення вертикальних рухів. Цей зв'язок є настільки добре вираженим, що вказані характеристики можна використовувати як предиктори опадів, особливо сильних. Цінність цього висновку полягає в тому, що в методах прогнозу опадів можна не враховувати вертикальні рухи або вологу, яка сконденсувалася. В якості предикторів можна використовувати величини, які розраховуються по полях вітру, температури і тиску [3]. Поле вологості використовується в мінімальній мірі. Наприклад, один з таких предикторів – фронтальний параметр, який запропоновано в роботах [5-7], залежить від вологості тільки через еквівалентну добавку до температури. Ця залежність виявляється через характеристику барокліності, яка є функцією горизонтального градієнта еквівалентної температури деякого шару атмосфери.

Об'єкти дослідження та вихідні матеріали. Фронтальний параметр є кількісною характеристикою інтенсивності атмосферних фронтів. Існує декілька таких характеристик.

Вперше поняття фронтального параметру ψ було введено в роботі [7], автори якої цю характеристику використовували виключно для проведення ліній фронтів на синоптичних картах і картах баричної топографії. Фронтам відповідали лінії, проведені через точки з максимальними значеннями параметра ψ . Але в дослідженнях, виконаних в Російському ГМЦ [1, 2, 5, 6], було показано, що цю характеристику можна використовувати для визначення фронтальних областей, з якими, як правило, пов'язані зони опадів, тобто фронтальний параметр є більш інформативною характеристикою в порівнянні з тим змістом, який надали йому автори [7]. Цей висновок підтверджується і результатами інших робіт [8, 9]. Зокрема, авторами даної статті проведено аналіз полів фронтального параметра ψ та опадів, зони яких пов'язані з двома гілками полярного

фронту. Розрахунок параметра ψ виконано за даними об'єктивного аналізу полів температури та вологості на ізобаричних поверхнях 850, 700 і 500 гПа за 00^h 14.12.2009 р.; для аналізу використані також синоптичні матеріали і поля вихору швидкості вітру та опадів

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В теперішній час проблемою об'єктивного аналізу атмосферних фронтів займаються в основному вчені Російського ГМЦ. В роботах [1, 6] на основі результатів фронтологічного аналізу синоптиків (суб'єктивного) визначено додатковий параметр P , який ураховує ступінь циклонічності баричного поля. Лінійна комбінація параметрів ψ і P являє собою так званий комбінований параметр F , який ураховує барокліність нижньої половини тропосфери і циклонічність нижньотропосферного баричного поля. Саме цей параметр використовується в Російському ГМЦ для об'єктивного аналізу атмосферних фронтів і для виявлення ступеня зв'язку фронтального параметра з опадами.

Впродовж останніх років авторами [2, 3] проведена велика кількість чисельних експериментів з прогностичними моделями, які мають різне просторове розділення. Для чисельного моделювання відбирались випадки інтенсивного циклогенезу, сильних опадів і стратосферних вторгнень. Чисельні експерименти проводились з моделями, які використовуються в ГМЦ РФ в оперативному режимі і в дослідницьких цілях [2, 4]. Зокрема велика серія розрахунків була виконана за даними глобальної напівлагранжової моделі (НЛМ) і моделей ETA і MM5 [4].

Чисельні експерименти з використанням моделей з різним просторовим розділенням передбачали виконання двох основних задач.

1. Моніторинг якості чисельного прогнозу діагностичних характеристик (таких як фронтальний параметр, рівень нульової плавучості, фронтогенетична функція, потенціальний вихор, висота тропопаузи).
2. Вивчення конкретних випадків циклогенезу, фронтогенезу і сильних опадів за допомогою чисельного моделювання.

Перша з названих задач вирішувалась шляхом розрахунку полів вказаних вище діагностичних характеристик за вихідними модельними даними і їх порівняння з „фактом”, тобто з тими ж діагностиками, які розраховані за даними об'єктивного аналізу відповідно до прийнятої в моделі схеми. При цьому використовувались вихідні дані глобальної моделі НЛМ на сітці з кроками 2.5×2.5 , 1.25×1.25 і $0.9 \times 0.72^\circ$, а також дані регіональних моделей ETA і MM5 з кроком 0.33° по широті і довготі.

Область розрахунків – це райони Європи з центральною точкою 55° півн.ш., 40° сх.д. і розміром 240×121 вузлів сітки. Тобто область дослідження розташована між 35 і 75° півн.ш. та 0 і 80° сх.д. Таким чином, ця область включає і територію України.

В роботах [2, 3] викладені результати досліджень зв'язку кількісних характеристик атмосферних фронтів з опадами, які показали, що в зимовий період найбільш тісно опади пов'язані з фронтальним параметром F . Цей результат повністю відповідає фізиці процесів опадоутворення. Дійсно, відомо, що опади в холодну пору року формуються, як правило, в області атмосферних фронтів, тобто в бароклічних зонах, які найчастіше пов'язані з циклонічними баричними полями. Тому в таких зонах параметр F , як характеристика бароклічності і циклонічності нижньої половини тропосфери, має підвищені значення. В роботі [3] на основі аналізу великого об'єму розрахованих характеристик зроблено висновок, що фактори, які кількісно характеризуються параметром F (бароклічність і циклонічність) дають основний внесок в динамічне змушення опадів в реальній атмосфері. Автори [3] підкреслюють, що вказані фактори відіграють головну роль генерації висхідних рухів, які зумовлюють виникнення зон опадів, тому поряд з бароклічністю і циклонічністю доцільно

враховувати ще й ефекти конвективної нестійкості. Кількісно ці ефекти описуються рівнем нульової плавучості H_k (в англійській літературі LNB – Level of Null Buoyancy).

Як відомо, внесок конвективної нестійкості є мінімальним взимку, а навесні та влітку він суттєво зростає і відіграє велику роль в формуванні зон опадів. За даними роботи [3] взимку конвективна нестійкість відмічається в 8-10% вузлів сітки, навесні – в 16-20% і влітку – приблизно в 30% вузлів від загальної кількості вузлів в вибірках. Практично в усі сезони в квадратах з конвективною нестійкістю середня повторюваність опадів з інтенсивністю >1 і >6 мм/12 год в кілька разів перевищує їх середню повторюваність в квадратах зі стійкою стратифікацією. Влітку цей ефект максимальний, але і взимку аналогічні повторюваності відрізняються більш ніж у два рази. Цей результат дає авторам [3] можливість стверджувати, що барокліність не тільки генерує конвективну нестійкість, але й сприяє її реалізації, оскільки повторюваність опадів при конвективній нестійкості тим більша, чим більше F (це особливо помітно взимку, коли термічний фактор відіграє невелику роль).

Розглянемо результати оцінки успішності прогнозування рівня нульової плавучості H_k і фронтального параметра F , які одержані шляхом чисельних експериментів відповідно до першої задачі, сформульованої вище.

Виправданими вважаються прогнози значення H_k , які попали в той же інтервал висот (<3 , $3-8$, >8 км, тобто відсутність конвекції або неглибока конвекція, середня і глибока конвекція відповідно), що і розраховані в тому ж вузлі сітки за даними об'єктивного аналізу в строк прогнозу.

Глобальна модель (НПЛ) по європейському регіону показала успішність, яка мало змінюється від сезону до сезону і складає 86-88% вузлів, при цьому відсотки знижених і завищених прогностичних H_k практично однакові.

Регіональні моделі ETA і MM5 прогнозують рівень H_k у вузлах сітки з успішністю 75% вузлів при частках випадків завищених і занижених значень H_k , які мало відрізняються.

Для оцінок якості чисельного прогнозу фронтального параметра F весь діапазон F поділявся на 5 інтервалів (0-20, 21-40, 41-60, 61-100, >100 ум. од.). Значення $F < 20$ відповідає переважно внутрішньомасовим умовам, $F = 21-40$ – слабким фронтам або периферіям фронтальних зон, $F = 41-60$ – фронтам помірної інтенсивності, а $F = 61-100$ і $F > 100$ – інтенсивним і дуже інтенсивним фронтам відповідно. Середня повторюваність опадів > 1 мм/12 год від одного інтервалу до наступного змінюється на величину приблизно 10%.

Чисельні експерименти показали, що рівні успішності прогнозів F у вузлах сітки мало відрізняються для різних моделей і в цілому значно (близько 20%) нижче успішності прогнозу H_k . Найбільш високі показники отримані для НЛМ при кроці вихідних даних 2.5° (успішність складає 65-68% вузлів) [4].

Порівняння полів F , які розраховані з використанням різних моделей, дозволило авторам [3, 4] виявити деякі нові деталі завдяки більш високому розділенню, а саме:

- зони атмосферних фронтів при кроці 1.25° , тим більше в напівлагранжевій моделі з кроком $0.9 \times 0.72^\circ$ та в моделях MM5 і ETA, за своєю формою набагато краще погоджуються із зображенням фронтів на картах погоди і на супутникових знімках: характерна кривизна, мезомасштабні осередки максимальної барокліності (гіпербароклінні зони), неоднорідність фронтів у продольному напрямку яскраво проявляються в усіх випадках. Завдяки цьому зони фронтів на дрібній сітці вигідно відрізняються від зон на сітці $2.5 \times 2.5^\circ$;
- порівняння діагностичних і прогностичних полів F показує в цілому добру узгодженість, в тому числі і в положеннях згаданих вище мезомасштабних особливостей. Контрасти в полі F на дрібній сітці більші, ніж на сітці $2.5 \times 2.5^\circ$,

- внаслідок чого навіть маленький зсув в локалізації прогностичних мезомасштабних максимумів (які мають вигляд витягнутих уздовж фронту смуг або ланцюжків) приводить до великих похибок прогнозу F у вузлах сітки;
- зони конвективної нестійкості в моделях з більш високим в порівнянні з $2.5 \times 2.5^\circ$ розділенням також прогнозуються в цілому більш успішно в розумінні їх локалізації, зв'язку з фронтами і циклонами, форми і інтенсивності. За даними моделей з дрібною сіткою (НЛМ, ЕТА і ММ5) зроблено висновок про перспективність використання зон конвективної нестійкості (ЗКН) замість H_k як міри конвективної нестійкості.
 - сильні (>6 мм/12 год) опади як в теплий, так і в холодний сезони випадають в модельних фронтальних та/або конвективних зонах, при цьому моделі з дрібною сіткою дають, як правило, більш високий ступінь узгодження між прогностичними полями F і H_k та фактичним полем опадів.

Найбільш важливим результатом цього дослідження є розвиток методу ймовірнісного прогнозу опадів на основі нового підходу (альтернативного відносно до прямого чисельного моделювання опадів) з використанням двовимірних (для F і H_k) спектрів повторюваності опадів.

На закінчення відмітимо, що в ГМЦ Росії чисельні експерименти проводилися не тільки для виявлення ефективності комбінованого параметра F [2-4], але досліджувався також зв'язок з опадами і більш простого параметру ψ [1, 5, 6], який, як сказано вище, враховує в основному барокліністичність нижньої половини тропосфери. Розрахунки параметра ψ значно простіші, тому що не потребують аналізу баричного поля з метою оцінки ступеня його циклонічності.

Як приклад наведемо результати фронтологічного аналізу, виконаного авторами даної статті для ситуації, яка відбувалась на території європейського континенту 14 грудня 2009 р. (рис. 1в). Західна і центральна частини Середземноморського басейну, а також південні райони України і європейської Росії знаходяться під впливом двох циклонів. Центральна частина одного з них розташована над Каспійським морем, а другого – біля східного узбережжя Піренейського півострова.

Опади інтенсивністю до 15 мм за добу спостерігалися над Кавказом і прилеглими районами. Зона більш інтенсивних опадів (до 23 мм/ добу) розташовувалась над центральною частиною Середземного моря і його північним узбережжям (рис. 1г); обидві зони опадів пов'язані з ділянками фронтів, які проходять практично паралельно один одному між 35 і 50° півн.ш. (рис. 1в).

Поле фронтального параметра представлено на рис.1а, де найбільш темним ділянкам відповідають від'ємні значення ψ , які свідчать про відсутність фронтів. Велика область додатних значень ψ , що окреслюється ізолінією $\psi=5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1}$, орієнтована з південного сходу на північний захід і збігається з широтною смугою, де розташовані обидві гілки полярного фронту. Першій зоні опадів (менш інтенсивній) відповідають значення параметра ψ від 15 до 30 (тут і далі порядок і розмірність не вказуються). Зона опадів над Середземним морем пов'язана з ділянками теплих фронтів, де ψ набирає як від'ємних, так і додатних значень (в основному від 5 до 10).

В роботі [1] відзначається, що більша частина вузлів з опадами потрапляє всередину зони фронту, яка окреслюється ізолінією $\psi=5$. В нашому випадку перша зона опадів повністю розташована в тій частині поля фронтального параметра, де $\psi > 5$, а друга – частково. Отже, зв'язок параметра ψ з опадами явно простежується, але більш чітко він виявляється для опадів на холодному фронті (над Північним Кавказом), що узгоджується з результатами досліджень [2-4], згідно з якими за допомогою параметра ψ добре виявляються саме холодні ділянки фронтів.

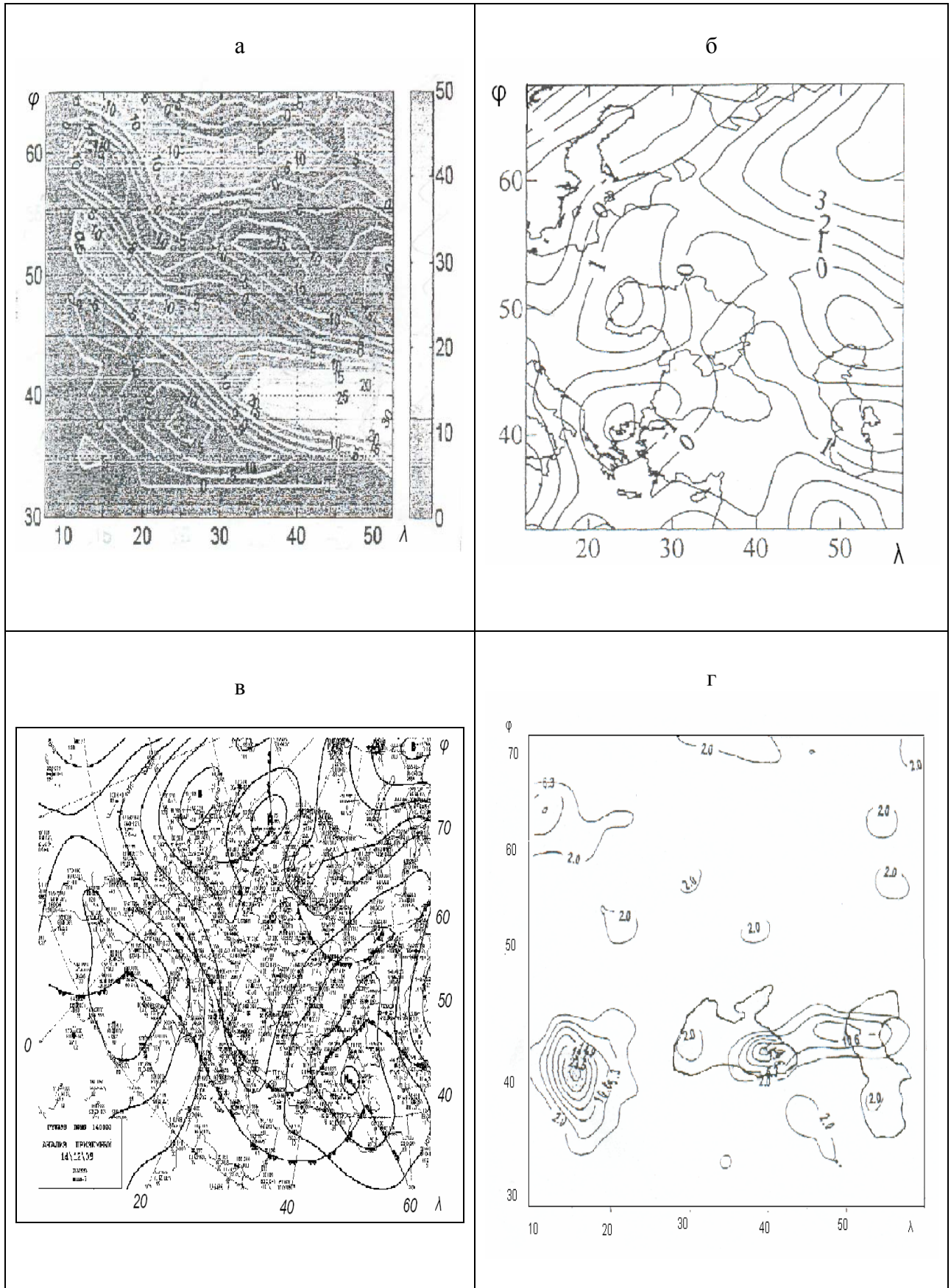


Рис.1 – а – фронтальний параметр $\psi \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1}$; б – вихор швидкості (10^{-5} с^{-1}); в – приземний аналіз; г – опади (мм/добу) за 14.12.2009 р.

Щодо кількісного зв'язку параметра ψ з опадами, то в нашому випадку його важко прокоментувати, тому що на формування розглянутих зон опадів впливали не тільки фронти, а й орографія. Це стосується перш за все Альпійських та Апеннінських гір, де більш інтенсивним опадам відповідають порівняно невеликі значення ψ . Через складну орографію неможливо також оцінити вплив циклонічності поля тиску на інтенсивність фронтів, оскільки поле вихору є малоградієнтним та плямистим (рис.1б).

Проте результати даного аналізу підтверджують основні висновки, які отримані в роботах [2-4,6,8], а саме: параметр ψ не забезпечує належної ефективності фронтального аналізу, але виявляє найбільш інтенсивні ділянки фронтів, з якими пов'язані зони опадів (особливо сильних).

Висновки:

На основі чисельних експериментів, виконаних в ГМЦ РФ з використанням великого обсягу інформації встановлено, що

- фронтальний параметр F і рівень нульової плавучості H_k можна використовувати для побудови імовірнісного методу прогнозу опадів, тому що точність їх прогнозу як предикторів досить висока;
- можливість використання параметра ψ в якості предиктора потребує подальшого обґрунтування шляхом чисельних експериментів з використанням моделей з різними кроками сіток і великим обсягом вихідних даних.

Список літератури

1. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // Метеорология и гидрология. – 2000. – №7. – С. 5-16.
2. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. и др. Диагностические исследования и моделирование процессов циклогенеза, фронтогенеза и погодных условий на различных стадиях развития циклонов // Труды ГМЦ РФ. – 2000. – Вып. 335. – С. 5-25.
3. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Расчет динамических факторов генерации осадков по данным объективного анализа // Метеорология и гидрология. – 2001. – №5. – С. 22-34.
4. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н. Спектр повторяемости осадков на территории Европейской части бывшего СССР в зависимости от интенсивности фронтальных зон и конвективной неустойчивости сеточного масштаба // Метеорология и гидрология. – 2006. – №4. – С. 5 - 18.
5. 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.

6. 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.
7. Huber-Pock F. and Kress Ch. An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products/ - Meteorol. Atmos. Phys.. – 1989. – Vol. 40, No.2. – P. 170-180.
8. Хоменко Г.В. Оценка эффективности объективного анализа атмосферных фронтов // Метеорология, климатология и гидрология. – 2008. – Вып. 50, ч. I. – С. 124-129.
9. Криволап Т.А. Оценка связи фронтального параметра с осадками // Збірник статей за матеріалами студентської наукової конференції ОДЕКУ 14-17 квітня 2009 р. – Одеса, 2009. – С. 6-9.

Результаты численного моделирования фронтотенеза и сильных осадков. Ивус Г.П., Хоменко Г.В.

Представлен обзор научных работ, которые выполнены в Российском ГМЦ в последние годы. В этих работах путем численных экспериментов с различными прогностическими моделями исследуется связь между количественными характеристиками атмосферных фронтов и осадками. Предложены методы прогноза осадков, которые не требуют учета вертикальных движений и сконденсированной влаги. Рассмотрена синоптическая ситуация с сильными осадками для оценки связи последних с интенсивностью атмосферных фронтов.

Ключевые слова: атмосферный фронт, фронтальный параметр, осадки, прогностическая модель.

The results of the numerical simulation of frontogenesis and heavy precipitation. Ivus G.P., Khomenko G.

A review of the recent scientific investigations carried out in the Russian Hydrometeorological Center is presented. In these contributions the relationship between the quantitative characteristics of atmospheric fronts and precipitation is examined by using the results of the numerical experiments for various prognostic models. The methods of the precipitation forecast in which it isn't necessary to account for the vertical motions and the condensate, are proposed. To estimate the relationship between precipitation and intensity of the atmospheric fronts the synoptic situation with the heavy precipitation observed is studied.

Key words: atmospheric front, frontal parameter, precipitation, prognostic model.