

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»
(ФГБУ «ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ»)

На правах рукописи

ЮСУПОВ ЮРИЙ ИСААКОВИЧ

**ПРОГНОЗ ШКВАЛОВ И ИНТЕНСИВНЫХ ОСАДКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ И ПОТЕНЦИАЛЬНОГО
ВИХРЯ ЭРТЕЛЯ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководители
доктор физико-математических наук

Л. В. Беркович

доктор физико-математических наук
В. А. Гордин

Москва

2021

Содержание	
Введение	4
1. Глава 1. Методы анализа и прогноза активной конвекции в атмосфере и связанных с ней явлений – шквалов и интенсивных осадков	13
1.1. Прогнозы конвекции.....	13
1.2. Методы прогноза интенсивных осадков в холодный период года	24
1.3. Методы прогноза шквалов.....	26
1.4. Выводы.....	30
2. Глава 2. Компьютерная технология изэнтропического анализа для краткосрочного прогноза погоды в оперативном режиме работы	32
2.1. Изэнтропический анализ атмосферных процессов	32
2.2. Технология изэнтропического анализа в архитектуре автоматизированного рабочего места (АРМ) синоптика.....	35
2.3. Изэнтропические траектории.....	40
2.4. Примеры практического использования оперативного изэнтропического анализа.	43
2.5. Выводы.....	56
3. Глава 3. Метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодный период года	57
3.1. Основа метода прогноза интенсивных осадков и алгоритм его реализации.....	58
3.2. Исследование эффективности выбранных предикторов и оценка результатов прогноза.....	60
3.3. Примеры прогноза случаев интенсивного снегопада в центральных регионах России.....	64
3.4. Выводы.....	67
4. Глава 4. Метод прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля	68
4.1. Разработка метода прогноза шквалов.....	70
4.2. Оценка эффективности использования предикторов и качества прогноза шквалов.....	75
4.3. Реализация метода прогноза шквалов и его применение на практике.....	77
4.4. Выводы.....	79
5. Глава 5. Исследование структуры тропосферного потенциального вихря масштаба мезо-γ в условиях глубокой влажной конвекции	80
5.1. Обзор исследований мезомасштабного потенциального вихря в	

тропосфере.....	80
5.2. Исследование структуры мезомасштабного потенциального вихря.....	82
5.3. Технология наукастинга в архитектуре АРМ Синоптика.....	97
5.4. Выводы.....	109
Заключение.....	111
Список литературы.....	113
Приложение.....	119

Введение

Актуальность проблемы

Прогнозы шквалов и интенсивных осадков являются одними из главных задач в численной метеорологии, поскольку, при определенных условиях, эти явления могут развиваться до уровней неблагоприятных (НГЯ) или даже до опасных явлений погоды (ОЯ) и представлять угрозу безопасности населения и нанести значительный ущерб различным отраслям экономики. Эти явления, а также град, сильные грозы возникают благодаря развитию глубокой влажной конвекции. В метеослужбах ряда стран (США, Канада и др.) принято объединять явления погоды, связанные с развитием глубокой влажной конвекции одним названием - конвективный шторм [49]. Методы прогноза гроз, града, шквалов и интенсивных осадков основаны на определении возможности реализации конвекции. Основная сложность в прогнозировании активной конвекции и ее динамики заключается в интенсивном взаимодействии процессов, имеющих различные масштабы во времени (от 10^2 до 10^5 секунд) и пространстве (от γ -микромасштаба (2 – 20 м) в процессах при создании облаков, до α -мезомасштаба (200 – 2000 км) в мезомасштабных конвективных системах).

Для возникновения глубокой влажной конвекции необходимо выполнение трех условий [45, 52]: наличие динамического вынуждения (вертикальных движений, возникающих под действием силы, вызванной, например при подтекании холодного воздуха на теплый на холодных фронтах или при натекании воздуха на склоны гор), в результате которого осуществляется подъем воздушных частиц до уровня свободной конвекции; влажная (условная) неустойчивость атмосферы; наличие достаточной влажности в приземном слое.

Основной критерий, с помощью которого оценивается возможность развития конвекции, состоит в определении запасов энергии неустойчивости [25, 52]. На практике в качестве критерия конвективной неустойчивости используется разность температуры частицы, поднимающейся адиабатически от поверхности земли (или воды), или от наиболее неустойчивого слоя около земной поверхности толщиной 100 – 300 гПа, и температуры окружающей среды.

Однако, информация о стратификации температуры и влажности, дает только часть полной картины динамики атмосферы. Известны случаи [48], когда при развитии шквалов не было зафиксировано положительной энергии неустойчивости. В холодный период года лишь в 9% конвективные процессы связаны с конвективной неустойчивостью [65].

Для описания метеорологических явлений синоптического масштаба изэнтропический анализ с привлечением полей вертикальной составляющей изэнтропического потенциального вихря Эртеля, может предложить новый взгляд на динамику конвективных процессов.

Изэнтропический анализ дает синоптику возможность учета трехмерности процессов в атмосфере, при работе с “плоской” изэнтропической картой. Потенциальный вихрь Эртеля, являясь локальным инвариантом уравнений идеальной газовой динамики.

В этой модели воздушные частицы движутся по изэнтропическим траекториям, и значение потенциального вихря в них не изменяется. Это свойство потенциального вихря, а также то, что он в каждой частице зависит от изменения как количества движения, так и от притока тепла, позволяет использовать его для прогноза глубокой влажной конвекции.

Динамика потенциального вихря при мезомасштабных (2 – 20 км) процессах еще недостаточно изучена, однако существуют теоретические предположения [66, 71], подтвержденные модельными исследованиями [44, 71], о том, что в условиях глубокой влажной конвекции в бароклинической зоне (бароклиничность, согласно [52] - состояние атмосферы, при котором плотность воздуха является не только функцией давления, но и других параметров, например температуры) в тропосфере образуются горизонтально ориентированные диполи – пары положительных и отрицательных аномалий потенциального вихря вокруг восходящего конвективного потока. Отслеживание эволюции этих диполей способно оказать помощь в решении задач наукастинга при прогнозировании опасных и неблагоприятных явлений погоды, возникающих при глубокой влажной конвекции.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы заключается в создании методов краткосрочного прогноза шквалов и интенсивных осадков с использованием изэнтропического анализа и расчетов изэнтропического тропосферного потенциального вихря Эртеля.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **основные задачи**.

1. Создание компьютерной технологии изэнтропического анализа атмосферы, функционирующей в оперативном режиме.
2. Разработка метода прогноза интенсивных осадков в холодный период года с использованием векторной фронтогенетической функции и изэнтропического потенциального вихря в состоянии насыщения.
3. Разработка метода прогноза шквалов с использованием изэнтропического потенциального вихря Эртеля
4. Исследование мезомасштабной (мезо-γ) структуры потенциального вихря в условиях глубокой влажной конвекции с использованием расчетов по выходной информации мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW.
5. Авторские испытания разработанных методов.

Научная новизна

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан метод прогноза интенсивных осадков в холодный период года, который позволяет оценить количество осадков в зависимости от значения полей векторной фронтогенетической функции и потенциального вихря в состоянии насыщения.
2. Разработан метод прогноза шквалов, выявляющий зоны глубокой влажной конвекции на основе расчета пересечения области аномалии потенциального вихря в средней тропосфере и приземных бароклинических зон.
3. Разработана и впервые реализована в оперативном режиме технология изэнтропического анализа на основе выходной информации гидродинамических моделей.
4. Впервые, с помощью расчетов по выходной информации модели WRF-ARW, воспроизведены в масштабе мезо-γ, на основе исследования мезомасштабной структуры потенциального вихря в средней и нижней тропосфере, вблизи конвективного восходящего потока в средней тропосфере, в условиях развития глубокой влажной конвекции горизонтально ориентированные диполи аномалий потенциального вихря. По архиву прогнозов лета 2020г. было исследовано 18 случаев конвекции. Во всех случаях наблюдались диполи указанного вида. Информация о присутствии диполей в индивидуальной грозовой ячейке позволяет использовать полученные результаты совместно с данными метеорологических радиолокаторов для наукастинга зон активной конвекции.

Достоверность полученных результатов

Достоверность определяется использованием современных представлений о динамике атмосферы, теоретически обоснованных подходов к диагнозу и прогнозу зон активной конвекции и развития в этих зонах шквалов и интенсивных осадков. В работе использовались наряду с прогностическими данными гидродинамических моделей, данные стационарных наблюдений и информация метеорологических радиолокаторов, что позволило с большой точностью верифицировать разработанные в диссертации методы прогноза. Обоснованность основных результатов исследований подтверждается также публикациями в российских журналах и представлением их на российских и международных конференциях.

Практическая значимость работы

Результаты работы обладают практической значимостью для:

- повышения качества общего прогноза погоды;

- получения синоптиком дополнительной информации о процессах, происходящих в атмосфере;
- более точного прогноза интенсивных осадков в холодный период года, включая градации неблагоприятных и опасных явлений погоды, с заблаговременностью до 18 ч;
- более точного прогноза шквалов в летний период, включая градации неблагоприятных и опасных явлений погоды, с заблаговременностью до 12 ч;
- повышения качества сверхкраткосрочного прогноза опасных и неблагоприятных явлений погоды (град, шквалы, осадки).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Компьютерная технология изэнтропического анализа, функционирующая в оперативном режиме.
2. Метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодное время года, основанный на использовании векторной фронтогенетической функции, эквивалентно-потенциального вихря в состоянии насыщения и относительной влажности воздуха в нижней тропосфере.
3. Метод прогноза зон активной конвекции со шквалами, основанный на расчете пересечения области аномалии потенциального вихря в средней тропосфере и приземных бароклинных зон.
4. Результаты исследования мезомасштабного потенциального вихря в условиях глубокой влажной конвекции с помощью расчетов по выходной информации мезомасштабной модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 6х6 км, показывающие, что вблизи восходящего конвективного потока образуются горизонтально ориентированные диполи аномалий потенциального вихря, позволяющие отслеживать эволюцию индивидуальной грозовой ячейки.

Апробация работы

Результаты работы представлялись (доклаживались) на следующих конференциях:

- 3rd European Conference on Application of Meteorology ECAM 1997 23 – 26 September 1997, Lindau, Germany.
- 4th European Conference on Application of Meteorology ECAM 1999, 23 – 26 September 1999, Norrköping, Sweden
- Отраслевое совещание «Новые технические средства и технологии для применения в гидрометеорологии и смежных с ней отраслях», 17 – 21 сентября 2001 г., г. Обнинск.

- 5th European Conference on Application of Meteorology ECAM 2001, 24 – 28 September, 2001 Budapest, Hungary
 - Оперативно-производственное совещание «Использование прогностической продукции численных моделей Гидрометцентра России и других НИУ в оперативной работе УГМС: новые технологии, внедренные в оперативную практику на современных ЭВМ», 15 – 19 октября 2001 г., Москва.
 - Всероссийская конференция «М. А. Петросянц и современные проблемы метеорологии и климатологии», 17 – 18 ноября 2009 г., Москва.
 - Результаты докладывались на научных семинарах по краткосрочным прогнозам погоды в Гидрометцентре России в 2008, 2009, 2011, 2012, 2020 гг.
 - Научно-техническая конференция «Вопросы научной и технической поддержки совершенствования метеорологического обеспечения гражданской авиации», 8 – 9 ноября 2016, Москва.
 - Всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», 21– 23 марта 2018 г., Иркутск.
 - Доклад на семинаре «Дифференциальные уравнения и численные методы» Высшей школы экономики, 17 и 24 сентября 2020 г., Москва.
 - Всероссийская конференция, посвященная памяти академика А. М. Обухова. «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», 10 – 12 ноября 2020 г., Москва.
 - III Всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», 25 – 27 ноября 2020 г., Иркутск.
- Разработанные методики легли в основу программного обеспечения АРМ Синоптика [1].

Получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Юсупов Ю. И. Оперативная трехмерная траекторная модель. №2009615056 от 16 сентября 2009
2. Юсупов Ю. И. Оперативная модель объективного фронтального анализа. №2009615058 от 16 сентября 2009
3. Юсупов Ю. И. Оперативная модель объективного изэнтропического анализа. №2009615057 от 16 сентября 2009
4. Юсупов Ю. И. Оперативная модель формирования сильных шквалов. №2009615059 от 16 сентября 2009

Публикации

По теме диссертации опубликовано 27 работ, в числе которых 10 статей в реферируемых ВАК журналах, из них 3 работы без соавторов.

Список публикаций по теме диссертации

Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК:

1. Акулиничева А. А., Беркович Л. В., Соломахов А. Ю., Шмелькин Ю. Л., **Юсупов Ю. И.** Геоинформационная система “Метео” и состояние ее использования в метеослужбах России и ближнего зарубежья. //Метеорология и гидрология. – 2001.–№.11.–С.90–98.
2. Белоусов С. Л., Беркович Л. В., **Юсупов Ю. И.** Краткосрочный гидродинамический прогноз метеовеличин с использованием технологии автоматизированного рабочего места синоптика //Метеорология и гидрология. – 1994. – №. 11. – С. 33-48.
3. Белоусов С. Л., **Юсупов Ю. И.** Расчет трехмерных траекторий воздушных частиц //Метеорология и гидрология. – 1991. – №. 12. – С. 41-48.
4. Зароченцев Г. А., Рубинштейн К. Г., Бычкова В. И., Игнатов Р. Ю., **Юсупов Ю. И.** Сравнение нескольких численных методов прогноза туманов //Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31. – №. 12. – С. 981-987.
5. Игнатов Р. Ю., Рубинштейн К. Г., **Юсупов Ю. И.** Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений. // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33. – №. 9. – С.
6. Калинин Е. Д., **Юсупов Ю. И.** Метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодный период года //Метеорология и гидрология. – 2012. – №. 4. – С. 19-28.
7. Рубинштейн К. Г., Губенко И. М., Игнатов Р. Ю., Тихоненко Н. Д., **Юсупов Ю. И.** Эксперименты по усвоению данных сети грозопеленгации //Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32. – №. 11. – С. 936-941.
8. **Юсупов Ю. И.** Использование изэнтропического анализа в оперативном краткосрочном прогнозе погоды, 2012 //Метеорология и гидрология. – 2012. – №. 1. – С. 42-49.
9. **Юсупов Ю. И.** Метод прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля. //Метеорология и гидрология. –2013. –№.11. –С.55 - 63.
10. **Юсупов Ю. И.** Исследование структуры тропосферного потенциального вихря в масштабе мезо-γ при глубокой влажной конвекции с помощью модели WRF-ARW // Процессы в геосредах. – 2020. – №. 4 (26). – С. 983 - 988.

Содержание диссертации также отражено в следующих публикациях:

11. Акулиничева А. А., Соломахов А. Ю., Шмелькин Ю. Л., **Юсупов Ю. И.** Практическое использование геоинформационной системы Метео и направления ее развития. //Труды Гидрометцентра РФ. Выпуск 334, Гидрометеиздат, Санкт-Петербург, 2000. – С. 163 – 179.

12. Рубинштейн К. Г., Игнатов Р. Ю., **Юсупов Ю. И.**, Титов Д. Е. Использование тепло-балансного метода для прогнозирования гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи // Энергия единой сети. – 2018. – №. 2. – С. 42-50.
13. Шмелькин Ю. Л., Соломахов А. Ю., **Юсупов Ю. И.**, Васильева Е. А. Мониторинг и прогнозирование ряда опасных гидрометеорологических явлений с помощью технологии ГИС Метео. // Тезисы докладов. Научно-практическая конференция "Проблемы и пути развития системы гидрометеорологической безопасности Союзного государства", ФГБУ "НПО Тайфун", г. Обнинск, –2012. –С. 33.
14. Шмелькин Ю. Л., **Юсупов Ю. И.** Новые возможности ГИС Метео // Русский инженер. – 2012. – №. 1. – С. 32.
15. **Юсупов Ю. И.** К вопросу об оперативном прогнозе шквалов // Тр. ГМЦ РФ. – 2008. – №. 342. – С. 55-78.
16. **Юсупов Ю. И.** Модель формирования шквалов на основе использования потенциального вихря Эртеля. // Современные проблемы науки и образования - 2009.-№6. (приложение "Науки о Земле"). - С. 5
17. **Юсупов Ю. И.**, Латышева И. В., Петровский А. Б. Использование ГИС "Метео" в прогнозе опасных явлений в районе аэродрома Иркутск (на примере теплого периода 2007 года) // Метеоспектр. – 2008. – № 2. – С.96 - 106.
18. **Юсупов Ю. И.** Науकाстиг в технологии ГИС Метео. // Метеоспектр. – 2015. №1. – С.43-48.
19. **Юсупов Ю. И.** Комплексная система наукастига для авиации в технологии ГИС Метео. // Метеоспектр. – 2016. №4. – С. 72 – 81.
20. **Юсупов Ю. И.** Использование мезомасштабных диполей потенциального вихря для прогноза глубокой влажной конвекции. Сборник тезисов. Всероссийская конференция, посвященная памяти А. М. Обухова. Турбулентность, динамика атмосферы и климата. – 2020, Физматкнига, Москва.
21. **Юсупов Ю. И.** Влияние погодных условий на воздействие на воздушное судно спутного следа при полете на крейсерском режиме. // Метеоспектр. – 2020. №4. – С. 10 - 13.
22. **Юсупов Ю. И.**, Тихоненко Н. Д. Безопасный город – подсистема ГИС Метео. Труды IV Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития»/МГО 2020 имени Л. Н. Карлина. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2020. – С. 429 - 434.
23. Shmelkin Y., **Yusupov Y.**, Solomakhov A. The GIS Meteo Technology. Fifth European Conference on Applications of Meteorology ECAM 2001, Budapest, Hungary. -P. 186.

24. **Ioussoupov I. (Yusupov Y. I.)** Hazardous Weather Phenomena Forecast in GIS Meteo Technology. 2002, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, - P. 5-19 - 5-20.
25. **Yusupov Y. I.** Tracking Tropical Cyclones with Low Level Potential Vorticity. 2005, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, – P. 2-15 - 16.
26. **Yusupov Y. I.** Forecasting precipitation caused by slantwise convection. 2011, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, – P. 4-11 - 12.
27. **Yusupov Y. I.** Potential vorticity thinking in convective storms forecasting. 2014, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, – P. 2-17-18.

Благодарности

Выражаю глубочайшую признательность моему первому научному руководителю д.ф.-м.н. **Л. В. Берковичу**, сподвигнувшему меня на создание этой работы, к.ф.-м.н. **С. Л. Белоусову**, вдохновившему на появление самых первых расчетных задач в архитектуре АРМ Синоптика, к.г.н. **Б. Е. Пескову**, щедро делившемуся своими знаниями и опытом. Хочу выразить особую благодарность д.ф.-м.н. В. А. Гордину, ставшему моим новым научным руководителем и оказавшему неоценимую помощь в создании данной работы, д.ф.-м.н. К. Г. Рубинштейну, за невероятную энергию, с которой он поддерживал меня на протяжении всего времени работы над диссертацией. Мои слова благодарности к.г.н. А. А. Алексеевой, за внимательное изучение моей работы, за ценные научные консультации, д.г.н. Д. Ю. Гущиной, за доброе отношение и обсуждение диссертации, к.ф.-м.н. Е. Н. Кругловой за помощь в оформлении диссертации, к.г.н. И. В. Латышевой за сотрудничество и поддержку, д.ф.-м.н. А. М. Стерину, за ценные замечания, к.ф.-м.н. А. Н. Багрову, за обсуждение результатов экспериментов, к.ф.-м.н. Д. Я. Прессману, за доброжелательную критику. Особую признательность хочу выразить к.ф.-м.н. Ю. Л. Шмелькину, А. Ю. Соломахову, к.г.н. А. А. Акулиничевой, **М.Я. Шапиро**, **Г. В. Кравченко**, И. Н. Бойцовой, Е. А. Васильевой, О. И. Волынцевой, Е. М. Яковлевой, Е. Д. Калинину и всем сотрудникам НПЦ «Мэп Мейкер» за многолетнюю совместную работу над созданием технологии АРМ Синоптика. Огромное спасибо моему брату, к.ф.-м.н. В. И. Юсупову, с которым обсуждались многие проблемы, изложенные в диссертации.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, состоящего из 76 наименований. Работа представлена на 129 страницах, включая 42 рисунка и 14 таблиц.

Во введении показана актуальность темы и место решаемой в диссертации проблемы в метеорологии, перечислены методы ее решения, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведен краткий реферат основного содержания.

Первая глава посвящена обзору современных методов прогноза конвекции, а также

связанных с ней явлений – интенсивных осадков и шквалов.

Во второй главе описана технология изэнтропического анализа и его использование в оперативном прогнозе погоды. Изложены основные принципы изэнтропического анализа. Приведены алгоритмы построения изэнтропических траекторий. Представлены примеры использования разработанного алгоритма изэнтропического анализа для прогноза погоды.

В третьей главе описывается метод прогноза сильных конвективных осадков в холодное время года с использованием векторной фронтогенетической функции и потенциального вихря в состоянии насыщения.

В четвертой главе рассмотрен метод прогноза шквалов, построенный на основе взаимодействия аномалии потенциального вихря Эртеля в средней тропосфере с бароклинными зонами в нижней тропосфере.

Пятая глава посвящена исследованию структуры мезомасштабного (мезо-γ) потенциального вихря в средней тропосфере в условиях глубокой влажной конвекции.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Личный вклад автора. Все защищаемые научные положения получены при основном вкладе автора. Метод прогноза интенсивных осадков в холодный период года разработан совместно с программистом ООО «НПЦ «Мэп Мейкер» Калининым Е.Д.

Глава 1

Методы анализа и прогноза активной конвекции в атмосфере и связанных с ней явлений – шквалов и интенсивных осадков

1.1 Прогнозы конвекции

Конвекция в атмосфере возникает в результате разрешения неустойчивости. Тип неустойчивости зависит от того, какой силой, действующей в атмосфере, определяется поведение возмущений [30]. Статическая или конвективная (также встречается название “гравитационная”) неустойчивость проявляется в покоем воздухе под действием сил, действующих в вертикальном направлении – силы тяжести и силы плавучести [60]. Эта неустойчивость характеризуется тем, что под действием сил, действующих в вертикальном направлении, воздушная частица, сместившись немного по вертикали от исходного уровня и далее, не возвращается на исходный уровень, а продолжает движение с ускорением вверх [26, 60]. В статически неустойчивом ненасыщенном воздухе вертикальный градиент температуры должен быть больше сухадиабатического ($\gamma > \gamma_a$), а в насыщенном – больше влажноадиабатического ($\gamma > \gamma_{ва}$).

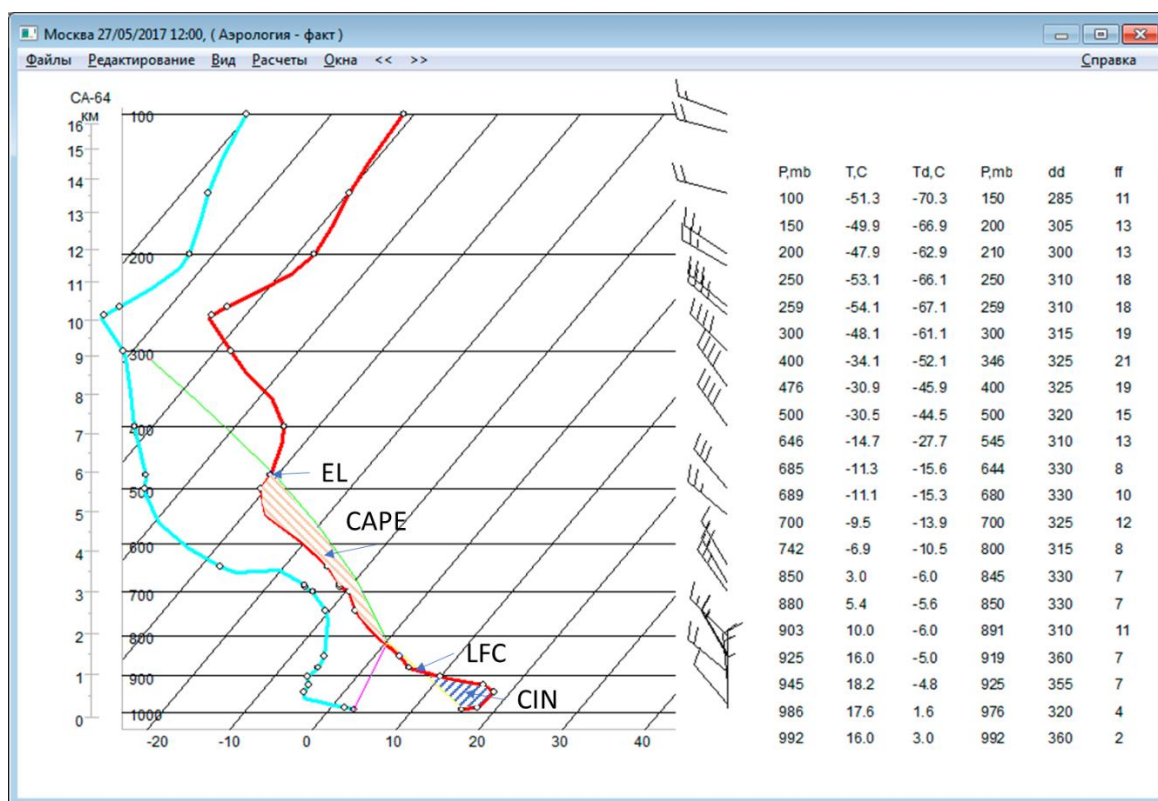


Рис. 1. Аэрологическая диаграмма по данным радиозондирования атмосферы по станции 27612 (г. Долгопрудный, Московская обл.) за 12:00 ВСУ 25 мая 2017 г.

На Рис.1 представлена аэрологическая диаграмма, построенная по данным радиозондирования атмосферы в 12:00 ВСУ 25 мая 2017 г. по станции 27612 (г. Долгопрудный, Московская

обл.). На диаграмме изображены кривые стратификации температуры (красный цвет) и точки росы (голубой). Построена кривая состояния, состоящая из сухой адиабаты (желтый) и влажной (зеленый). Красной штриховкой обозначена положительная энергия неустойчивости (CAPE), синей – CIN, энергия противодействия конвекции.

Воздушная частица, пока она находится в ненасыщенном состоянии, поднимается по сухой адиабате (Рис.1 – желтая линия). Достигнув уровня конденсации (достигнув насыщения), воздушная частица далее поднимается по влажноадиабатическому закону (Рис.1 – зеленая кривая). Влажноадиабатический градиент меньше сухоадиабатического, поскольку, при подъеме происходит конденсация избытка влаги и выделение скрытой теплоты конденсации.

Для возникновения глубокой влажной конвекции необходимо (но недостаточно) выполнение трех условий [45, 52]: наличие динамического вынуждения, в результате которого осуществляется подъем воздушных частиц до уровня свободной конвекции; неустойчивость в насыщенном воздухе; наличие достаточной влажности в приземном слое (более 60 %).

Наиболее часто атмосферная конвекция наблюдается в зонах атмосферных фронтов (ширина фронтальных зон у поверхности земли составляет примерно 100 км), где действует вынуждающий эффект восходящих движений.

Классический подход к анализу конвекции называется “методом частицы”. Этот метод предполагает, что в воздухе присутствуют отдельные частицы, не взаимодействующие с окружением. Можно представить воздушный шар, который поднимается, меняя объем. Воздух, находящийся в шаре, не обменивается теплом и влажностью с окружающим воздухом [60]. Воздушная частица в этом методе движется в неподвижной среде. Это является сильным упрощением процессов, которые в действительности происходят в атмосфере, однако, этот метод позволяет достаточно просто прогнозировать развитие конвективных явлений. Другой подход к прогнозу конвекции называется “метод слоя”. Метод слоя в отличие от рассмотренного ранее метода частицы предполагает, что в атмосфере при конвекции происходят не только восходящие движения воздушных частиц, но и нисходящие. Причем, подъем воздуха, происходит по влажноадиабатическому закону, а опускание – по сухоадиабатическому, уменьшая плавучесть поднимающихся воздушных частиц. Это происходит потому, что при опускании воздуха, температура его начинает расти, воздух становится ненасыщенным и изменение температуры идет по сухоадиабатическому закону.

При глубокой влажной конвекции в местах подъема образуются кучево-дождевые облака Сб. Эти облака, согласно классификации Всемирной Метеорологической Организации (ВМО), разделяются на три типа – одноячейковые, многоячейковые и суперячейковые.

Одноячейковые облака состоят из одной конвективной ячейки с конвективным восходящим потоком в центре. После своей грозовой активности, обычно, быстро разрушаются.

Продолжительность жизни таких облаков составляет 30 – 60 минут. Верхняя граница облака достигает высоты 10-12 км, поперечный размер – 5 - 20 км [26].

Многоячейковые облака состоят из нескольких конвективных ячеек, которые находятся в разных стадиях развития. Крупные скопления (более 200 км) кучево-дождевой облачности называются мезомасштабными конвективными комплексами (МКК) или мезомасштабными конвективными системами (МКС). Время жизни таких МКС составляет иногда до 18 часов (обычно меньше).

Суперячейковые облака имеют наиболее интенсивные грозовые и градовые очаги. Горизонтальные размеры составляют 20 – 40 км, высота 12 – 16 км. Время жизни иногда достигает 4 часов.

В отличие от статической неустойчивости, гидродинамическая неустойчивость наблюдается только в движущемся потоке [30]. Существует несколько видов гидродинамической неустойчивости. К этому типу атмосферной неустойчивости относятся инерционная, баротропная, бароклинная, симметричная, условная симметричная, неустойчивость Кельвина - Гельмгольца. Для проявления гидродинамической неустойчивости в атмосфере важен учет сил плавучести и Кориолиса [30]. Здесь мы рассмотрим только условную симметричную неустойчивость, поскольку именно с этим видом неустойчивости связано развитие наклонной конвекции. Согласно [52, 60], воздушная частица может быть устойчива в вертикальном и горизонтальном направлениях, то есть обладать и конвективной (статической, гравитационной) и инерционной устойчивостью, но быть неустойчивой к наклонному смещению. Такой тип неустойчивости называется симметричной неустойчивостью. На Рис.2 представлена схема, согласно [60], вертикального меридианального разреза атмосферы, на котором изображены изолинии потенциальной температуры (синие линии) и изолинии абсолютного углового момента $M_g = u_g - f y$, где u_g – составляющая геострофического ветра в направлении перпендикулярном плоскости разреза, f – параметр Кориолиса, y – расстояние по меридиану по оси Y . Абсолютный момент определяется как сумма моментов воздушной частицы относительно Земли и момента, возникающего из-за вращения Земли. Если рассматривать поле потенциальной температуры (на Рис.2 синие линии), при смещении вверх (вниз) воздушной частицы, она будет соответственно холоднее (теплее), чем окружающий воздух, возникнет сила в вертикальном направлении, которая вернет частицу на прежнее место. Например, при смещении воздушной частицы по вертикали из точки **A** в точку **A₁** потенциальная температура частицы (θ_p) меньше, чем потенциальная температура окружающей среды (θ_{env}). Возникнет сила (отрицательная плавучесть), которая вернет частицу на прежнее место. Аналогично, если рассматривать поле M_g (Рис.2 – красные линии), при смещении воздушной частицы по горизонтали в направлении

Севера (Юга), на частицу будет действовать восстанавливающая сила, пытающаяся вернуть частицу на прежнее место, туда, где окружающий воздух имеет такой же абсолютный момент, как воздушная частица. Воздушная частица будет устойчива в горизонтальном направлении, когда $\frac{\partial M_g}{\partial y} < 0$. Например, при смещении воздушной частицы из точки **A** в точку **A₂** абсолютный момент частицы M_{gp} будет больше абсолютного момента окружающего воздуха M_{genv} , возникнет сила, которая вернет частицу в точку **A**. Однако, при наклонном смещении (Рис.2) от точки **A** до точки **B** – возникает сила, заставляющая воздушную частицу двигаться с ускорением в направлении **AB**, поскольку в точке **B** потенциальная температура частицы будет больше, чем потенциальная температура окружающего воздуха ($\theta_p > \theta_{env}$), возникнет положительная плавучесть, также, в точке **B** момент воздушной частицы будет меньше момента окружающего воздуха ($M_{gp} < M_{genv}$), возникнет сила, перемещающая частицу в горизонтальном направлении.

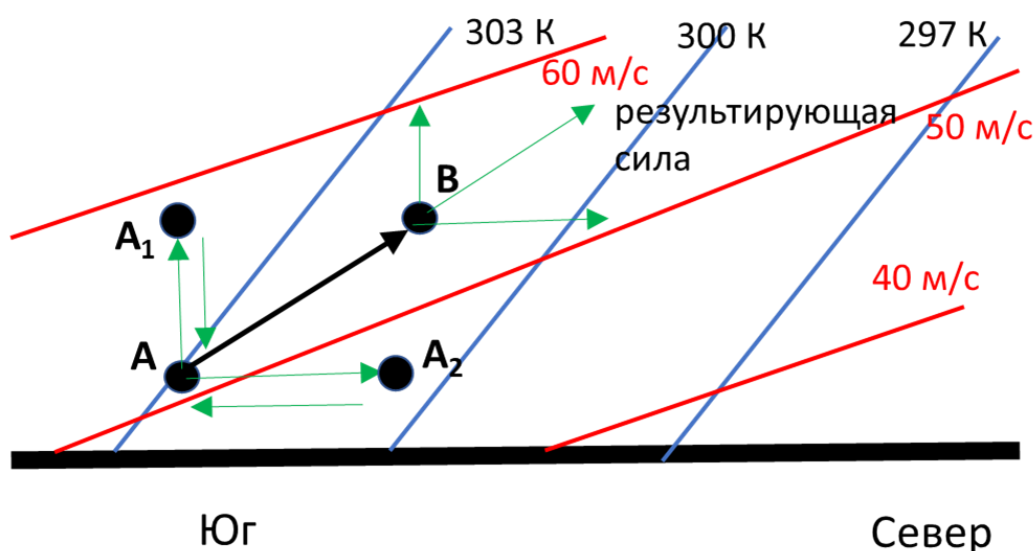


Рис.2. Вертикальный меридиональный разрез. Изолинии потенциальной температуры (синие линии) и геострофического абсолютного момента (красные) в атмосфере с симметричной неустойчивостью. При смещении воздушной частицы по вертикали из **A** в **A₁** возникает отрицательная плавучесть. При горизонтальном смещении из **A** в **A₂** момент частицы окажется больше момента окружающего воздуха, частица вернется на прежнее место. При наклонном смещении воздушная частица смещается из позиции **A** в направлении позиции **B**. Результирующая сила заставляет воздушную частицу двигаться с ускорением от своей начальной точки.

Термин "условная" означает, что воздушная частица рассматривается в состоянии насыщения. В результате разрешения условной симметричной неустойчивости возникает

наклонная конвекция, при которой бывают интенсивные осадки в холодное время года.

Основной принцип анализа и прогноза конвекции состоит в определении запасов энергии неустойчивости. Для определения статической неустойчивости используется разность между температурой поднимающейся частицы и температурой окружающего воздуха. В зависимости от количества энергии неустойчивости – доступной потенциальной энергии конвекции *CAPE*, - прогнозируют развитие конвекции той или иной интенсивности.

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{(T' - T)}{T} dz, \quad (1)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, T' - температура поднимающейся частицы, T – температура окружающего воздуха, LFC – уровень свободной конвекции, где начинается положительная плавучесть, EL - уровень выравнивания температур частицы и окружающего воздуха (см. Рис.1). Энергия неустойчивости может рассчитываться для частицы, поднявшейся от земли или от наиболее неустойчивого слоя. Следует отметить [60], что трудность в точном определении начала по времени конвекции связана с тем, что наличие энергии неустойчивости не является достаточным условием инициализации конвекции. Ниже уровня свободной конвекции (LFC) часто находится устойчивый слой, который необходимо преодолеть воздушной частице, поднимающейся с уровня Земли, для того чтобы инициировать конвекцию.

Работа по преодолению этого слоя называется *CIN* (энергия противодействия конвекции – Рис.1):

$$CIN = -g \int_0^{LFC} \frac{T_{vp} - T_v}{T_v} dz, \quad (2)$$

где T_{vp} и T_v - виртуальная температура поднимающейся частицы и окружающего воздуха соответственно. Виртуальная температура — это температура сухого воздуха, до которой нужно нагреть его для того, чтобы его плотность сравнялась с плотностью влажного воздуха, взятого с тем же давлением: $T_v = T \left(1 - \frac{e}{p} 0,622\right)$, где e – парциальное давление водяного пара, p – атмосферное давление.

CIN – мера негативной плавучести ниже уровня свободной конвекции. Для развития конвекции необходимо динамическое вынуждение, чтобы преодолеть энергию противодействия конвекции.

Вертикальная скорость конвективного потока (W) часто также является предиктором для прогноза развития конвекции и определения степени этого развития [26]:

$$W = \sqrt{2 CAPE} . \quad (3)$$

Коротко перечислим некоторые, наиболее известные физико-статистические методы

прогноза конвекции и индексы неустойчивости. Многие из этих методов и индексов основаны на методе частицы, где возможность развития конвекции описывается косвенным образом, а не напрямую.

Lifted Index [60]:

$$LI = T_{500} - T_{P,500}, \quad (4)$$

где T_{500} - температура на уровне 500 гПа, $T_{P,500}$ - температура частицы, поднявшейся с уровня P по сухой адиабате до уровня конденсации, а затем по влажной до уровня 500 гПа. Уровень, с которого поднимается частица, может быть уровнем земли или уровнем наиболее неустойчивого слоя, в котором производят осреднение температуры и влажности.

Индекс Вайтинга [26]:

$$K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - D_{700}, \quad (5)$$

где T_{850} , T_{500} – температура воздуха на уровнях 850 и 500 гПа, Td_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа, D_{700} – дефицит точки росы на уровне 700 гПа. При значении индекса более 20 есть вероятность развития конвективных явлений.

Индекс Total Totals [26] используется для прогноза развития конвекции.

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2T_{500}. \quad (6)$$

При значении $TT > 49$ прогнозируется развитие конвекции.

Индекс Шоултера [26] рассчитывается следующим образом:

$$SI = T_{500} - T_{pm500}, \quad (7)$$

где T_{pm500} – температура кривой состояния частицы, поднятой с уровня 850 гПа до уровня конденсации по сухой адиабате, затем до уровня 500 – по влажной адиабате. При этом, температура точки росы частицы принимается средней в слое 850 – 500 гПа. При $SI < -3$ следует ожидать развития конвекции.

Индекс потенциальной неустойчивости (EPI) [26]:

$$EPI = \theta_{e,500} - \theta_{e,850}, \quad (8)$$

где θ_e – эквивалентно-потенциальная температура на соответствующем уровне (850 или 500 гПа). Отрицательные значения EPI указывают на неустойчивость в атмосфере и, следовательно, благоприятные условия для развития глубокой конвекции.

Индекс глубокой конвекции (DCI) [57]:

$$DCI = T_{850} + T_{d850} - LI, \quad (9)$$

где T_{850} и T_{d850} – соответственно температура воздуха и температура точки росы на поверхности 850 гПа, LI – Lifted Index. При $DCI > 30$ следует ожидать развитие конвективных явлений, вызванных глубокой конвекцией.

Метод Н. В. Лебедевой [25]

Метод разработан для прогноза конвекции в часы ее максимального развития (15-16 ч. местного времени) для средних широт. Для реализации метода синоптику необходим набор карт погоды, барической топографии, вертикальных движений. По ним строятся прогностические кривые стратификации температуры и точки росы [25]. С помощью соответствующих прогностических методик определяется дневной прогрев (находится прогностическая максимальная температура). После этого определяется возможность развития конвекции, при этом различают три типа конвекции – термическая, свободная и вынужденная [25]. Далее рассчитываются параметры конвекции – суммарный дефицит точки росы на уровнях 850, 700, 500 гПа, разность прогностической максимальной температуры и точки росы у поверхности земли (°C), толщина конвективно-неустойчивого слоя (гПа), уровень конденсации (гПа), уровень конвекции (гПа), среднее отклонение кривой состояния от кривой стратификации (°C), мощность конвективных облаков (гПа). Все эти параметры имеют пороговые значения, превышение которых означает развитие конвективных явлений. Этот метод довольно трудоемкий, однако он используется не только синоптиками в оперативной работе, но и применяется в некоторых схемах численного прогноза [26].

Некоторые методы включают в итоговую формулу, по которой определяется вероятность развития конвекции, параметры сдвига ветра, так как согласно [45, 59] от сдвига ветра в слое 0 – 6 км зависит формирование типа кучево-дождевого облака. При сдвиге ветра до 10 м/с формируются одноячейковые облака с относительно коротким жизненным циклом (30 – 60 минут), при сдвиге 10 – 20 м/с – многоячейковые, а при сдвиге ветра более 20 м/с – суперячейковые. По [59] одноячейковые облака редко порождают сильные штормы, в отличие от многоячейковых, жизненный цикл которых доходит до нескольких часов и которые чаще всего сопровождаются сильными шквалами, градом и интенсивными осадками. Следует заметить [59], что, если одноячейковые облака перемещаются, в основном, по направлению ведущего потока в средней тропосфере, траектории перемещения многоячейковых штормов часто с направлением ведущего потока не совпадает.

Метод Д. Е. Пескова [26]:

$$u = 0.4 (T' - T)_{600} - 0.05 (T' - T_d)_{500} + 0.4 \nabla^2 P - 0.07 |\Delta V|_{700}^{300}. \quad (10)$$

Конвекция развивается, если функция $u \geq 0$. Здесь $\nabla^2 P$ – лапласиан приземного давления, рассчитывается по восьми точкам, удаленным от центральной на расстояние 250 км:

$$\nabla^2 P = \frac{1}{2} (P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_8 - 8P_0), \quad (11)$$

где $|\Delta V|_{700}^{300}$ – модуль разности векторов ветра на уровнях 700 и 300 гПа.

Метод Г. Д. Решетова [26], разработан для прогноза развития конвективных явлений на фронтах и предлагает для составления прогноза оценить характер синоптической ситуации. Расчеты необходимо проводить, если пункт прогноза находится в зоне холодного фронта или в зоне барической ложбины. Дискриминантная функция для расчета прогноза развития конвекции выглядит так:

$$L = -0.042 T_{\text{взо}} + 0.10 \Delta H_{0 \text{ взо}} - 0.562, \quad (12)$$

где $T_{\text{взо}}$ – температура верхней границы облачности, $H_{0 \text{ взо}}$ – высота верхней границы облаков, определяемая по условию равенства энергий (кривая состояния поднимающейся частицы строится после пересечения ее с кривой стратификации температуры до тех пор, пока площади, ограниченные кривыми состояния и стратификации выше и ниже точки пересечения, не сравниваются). При неотрицательном значении дискриминантной функции следует ожидать развития конвекции.

Метод Г. Д. Сосина [26], разработан для прогноза гроз в горных районах. Для прогноза по этому методу, необходимо построить прогностические кривые стратификации температуры и точки росы и по ним рассчитать суммарный дефицит точки росы на поверхностях 850, 700 и 500 нПа, разность псевдопотенциальных температур на поверхности 500 гПа и на нижней границе слоя падения псевдопотенциальной температуры с высотой, а также разность этих температур на нижней и верхней границах потенциально-неустойчивого слоя, разность дефицитов точки росы на поверхностях 850 и 500 гПа. Псевдопотенциальная температура – температура, которую принял бы воздух при адиабатическом процессе, если бы сначала весь содержащийся в нем водяной пар был сконденсирован при неограниченно падающем давлении и выпал бы из воздуха, выделившаяся скрытая теплота пошла бы на нагревание воздуха, который затем был бы приведен под стандартное давление [25]. После этих расчетов, по специальным графикам определяется возможность развития конвекции. Кроме того, анализируется стратификация воздушной массы, которая ожидается в пункте прогноза в 15 ч местного времени.

Метод Н. И. Глушковой и В. Ф. Лапчевой [26].

Этот метод предусматривает выявление по данным метеорологических радиолокаторов (МРЛ) конвективной облачности с осадками и построение траекторий воздушных частиц за период заблаговременности прогноза [26].

Метод В. М. Седлецкого [26].

Метод разработан для прогноза конвекции на холодных фронтах. Для составления прогноза по этому методу, необходимо построить прогностические кривые стратификации температуры и точки росы, по которым рассчитываются мощность слоя с положительной энергией неустойчивости, разность температур частицы, поднимающейся от земли до уровня 700

гПа и окружающего воздуха, такая же величина на уровне 500 гПа, сумма дефицита точки росы на поверхностях 850, 700, 500 гПа. Кроме того, учитывается и расчет индекса Вайтинга. В результате прогнозируется развитие конвекции, при толщине слоя с положительной энергией неустойчивости более 90 гПа, положительными значениями разности температур поднимающейся частицы и окружающей среды на поверхностях 700 и 500 гПа, сумме дефицита точки росы менее 30°C и показателе индекса Вайтинга более 20.

Для прогноза инициализации конвекции используется расчет конвергенции потока влаги - MFC [60]:

$$MFC = -\nabla \cdot (q V), \quad (13)$$

где q – удельная влажность воздуха, V – горизонтальный вектор ветра. Конвергенция потока влаги характеризует сходимость потоков в нижней тропосфере. Положительные значения свидетельствуют о подъеме влажного воздуха, благоприятного для развития глубокой влажной конвекции.

Относительная завихренность шторма (SRH) [60]:

$$SRH = \int_0^d \vec{k} (\vec{u}_h - \vec{c}) \times \vec{S} dz, \quad (14)$$

где \vec{k} – единичный вектор в вертикальном направлении, $\vec{u}_h - \vec{c}$, векторная разность между скоростью ведущего потока (\vec{u}_h) и шторма (\vec{c}), $\vec{S} \equiv \frac{\partial \vec{u}_h}{\partial z}$. По [57] SRH используется для прогноза суперячейковых штормов. При значении SRH более 400 м²с⁻² прогнозируются торнадо и сильные штормы.

Индекс BRN (Bulk Richardson Number) [60] является комбинацией энергии неустойчивости и сдвига ветра:

$$BRN = \frac{CAPE}{1/2(\Delta u^2 + \Delta v^2)}, \quad (15)$$

где Δu^2 и Δv^2 – разность скоростей среднего ветра в слое 0 - 6 км и ветра в приземном слое 0 - 500 м. Физически BRN представляет меру кинетической энергии. Значения BRN между 10 и 45 показывают большую вероятность развития суперячейкового шторма. Значения выше 45 благоприятны для развития одноячейкового или многоячейковых штормов.

В Табл. 1 представлены оценки успешности прогнозов конвекции по некоторым индексам, приведенным выше. В таблице по результатам работы [16] представлены общая оправдаемость прогноза гроз и коэффициент ложных тревог с заблаговременностью 24 ч. В [16] были обработаны данные за конвективный сезон 2013 г. по Европейской территории России. Общая оправдаемость в соответствии с [27] определяется как сумма оправдавшихся прогнозов гроз и оправдавшихся случаев отсутствия гроз, деленная на общее число гроз и случаев

без гроз. Коэффициент ложных тревог определяется как количество ложных прогнозов гроз, деленное на общее число гроз.

Таблица 1

Индекс	Общая оправдываемость	Коэффициент ложных тревог
CAPE (дж/кг· К)	0.29	5.5
CIN (дж/кг· К)	0.33	5.2
LI (°C)	0.33	5.0
K (°C)	0.46	5.1
TT (°C)	0.47	4.3
SI (°C)	0.45	4.1
Песков	0.42	4.5
BRN (дж с ² /кг·К·м ²)	0.30	5.4

По результатам Табл. 1 видно, что прогнозы развития конвекции, по указанным индексам и некоторым методам имеют общую оправдываемость, не превышающую 50%, кроме того, имеют большое количество ложных тревог, что сильно обесценивает перечисленные методы прогноза конвекции.

Изэнтропический анализ с привлечением полей изэнтропического потенциального вихря Эртеля, позволяет исследовать динамику конвективных процессов, предоставляя синоптику дополнительную, по сравнению с изобарическим анализом, информацию о процессах, происходящих в атмосфере [62].

В ряде работ [42, 45, 50, 67] для диагноза и прогноза зон активной конвекции предлагается воспользоваться расчетом изэнтропического потенциального вихря Эртеля в тропосфере:

$$PV = \frac{\vec{\zeta} \cdot \nabla \theta}{\rho}, \quad (16)$$

где $\vec{\zeta}$ - трехмерный вектор абсолютного вихря, θ - потенциальная температура. Потенциальный вихрь в синоптическом масштабе может быть использован для описания динамики циклогенеза, волн Россби [54].

В синоптическом масштабе (более 1000 км) для вычисления значения скалярного произведения в числителе используют только вертикальную составляющую, поскольку горизонтальные составляющие потенциального вихря на два порядка меньше вертикальной. Это можно доказать, проанализировав формулу потенциального вихря:

$$\begin{aligned}
\frac{(\Omega + 2\omega) \cdot \nabla \theta}{\rho} &= \frac{1}{\rho} \cdot \left[(\Omega_x + 0) \frac{\partial \theta}{\partial x} + (\Omega_y + 2\omega_y) \frac{\partial \theta}{\partial x} + (\Omega_z + 2\omega_z) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \approx \\
&\approx \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \left(-\frac{\partial u}{\partial z} + 2\omega \cos \varphi \right) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + 2\omega \sin \varphi \right] \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\} \approx \\
&\approx \frac{1}{\rho} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + 2\omega \sin \varphi \right] \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{\rho} (\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial z} = -g (\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}, \quad (17)
\end{aligned}$$

где ρ - плотность воздуха, f – параметр Кориолиса. Потенциальный вихрь измеряется в PVU, $1\text{PVU} = 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ К кг}^{-1}$.

Для движений синоптического масштаба порядок первого и второго слагаемых в фигурных скобках равен 10^{-8} . Действительно, подставим в формулу характерные значения: производная составляющей горизонтального ветра по вертикали $1/1000$ (1/сек), производная температуры по горизонтали $1/100000$ (градус/м), производная горизонтального ветра по горизонтали $10/100000$ (1/сек), производная температуры по вертикали $10/1000$ (градус /м).

Третье слагаемое имеет порядок 10^{-6} и представляет собой вертикальную составляющую трехмерного потенциального вихря. Напротив, в пространственном масштабе конвективного шторма (2 – 20 км) для вычисления значения потенциального вихря необходимо учитывать все составляющие, поскольку, согласно [44, 71], в этом случае горизонтальные составляющие на порядок больше вертикальной (подробнее об этом в Главе 5).

Потенциальный вихрь сохраняет свое значение в условиях адиабатичности, что превращает это значение в динамический трассер. С другой стороны, потенциальный вихрь является индикатором диабатического притока тепла. Положительная аномалия потенциального вихря в Северном полушарии имеет циклоническую направленность вращения, негативная – антициклоническую [54]. Здесь и далее под аномалией потенциального вихря синоптического масштаба подразумевается, согласно [54], положительный в Северном полушарии локальный максимум вертикальной составляющей изэнтропического потенциального вихря. Ниже (вниз по столбу воздуха) положительной аномалии, статическая устойчивость уменьшается, выше аномалии – увеличивается.

По [56, 66], наличие положительной аномалии потенциального вихря (PV) в верхних и средних слоях тропосферы приводит к уменьшению конвективной устойчивости в нижних слоях тропосферы. В [43] представлены результаты международного проекта, посвященного исследованию причин инициализации конвективных штормов (CSIP). Исследования проходили в летние периоды 2004-2005 и 2007 гг. с привлечением всевозможных средств наблюдения (спутники, радары, учащенное по времени и пространству радиозондирование), а также с использованием информации гидродинамических моделей различного разрешения (от

глобальных, до мезомасштабных с шагом сетки 1×1 км). Результаты исследования, в частности, содержат утверждение, что аномалии потенциального вихря в тропосфере являются следствием прогиба тропопаузы – образования локального минимума высоты тропопаузы. Образование положительной аномалии потенциального вихря в средней и верхней тропосфере согласно [43] всегда сопровождается затокком холодного стратосферного воздуха и вызывает изменения в стратификации температуры таким образом, что уменьшается статическая устойчивость в приземном слое атмосферы, уменьшается энергия противодействия конвекции (CIN) и увеличивается доступная потенциальная энергия конвекции (CAPE).

В [44, 56, 62] предлагается использовать расчет потенциального вихря для диагноза формирования и развития линии шквалов.

Потенциальный вихрь в масштабе мезо-γ изучен еще недостаточно хорошо, однако, есть исследования [44, 71], анализирующие динамику потенциального вихря в масштабе 2 – 20 км. Эти исследования показали, что при глубокой влажной конвекции потенциальные вихри в этом масштабе представляют из себя пары (диполи) положительных и отрицательных аномалий потенциального вихря в тропосфере. Эти диполи располагаются вблизи конвективного восходящего потока. В [44] были проведены численные эксперименты, в результате которых сделано заключение, что при отсутствии сдвига ветра и горизонтального градиента температуры, в условиях развития конвекции диполи располагаются вертикально (положительный ниже области максимального нагрева – выделения скрытой теплоты конденсации, отрицательный – выше). При сдвиге ветра в горизонтальном потоке и в присутствии горизонтального градиента температуры (в бароклинной зоне) диполи разворачиваются в горизонтальную плоскость. Согласно [60], подобные диполи были найдены и в окрестности тропических циклонов.

Исследования [44] позволяют предположить, что вдоль линии шквалов создается цепочка горизонтально ориентированных диполей в средней тропосфере. Известно [60], что вертикальный сдвиг ветра влияет на организацию мезомасштабной конвективной системы. Согласно [72], для образования многоячейковых штормов благоприятным условием является вертикальный сдвиг ветра 10 – 20 м/с слое 0 – 6 км. Увеличение сдвига ветра может привести к развитию суперячейковых облаков.

1.2 Методы прогноза интенсивных осадков в холодное время года

Большинство методов прогноза интенсивных конвективных осадков основано на использовании крупномасштабных предикторов [25]. Основным предиктором в этих методах прогноза осадков является конвективная вертикальная скорость, определяемая по энергии конвективной неустойчивости [25]. Такой подход для теплого времени года представляется

правильным, поскольку активная конвекция в это время года возникает благодаря разрешению конвективной неустойчивости. Однако, в холодный период года, согласно [65], лишь 9% конвективных явлений связаны с конвективной неустойчивостью. В [33], в качестве предикторов конвективной неустойчивости предложено использовать такие характеристики, как фронтальный параметр, фронтогенетическую функцию, потенциальный вихрь, высоту уровня динамической тропопаузы, уровень нулевой плавучести. В [33] делается вывод о том, что в холодный период года основными предикторами являются фронтальный параметр и фронтогенетическая функция.

В работе [12] оценивается зависимость количества осадков от интенсивности фронта, рассчитанного по алгоритму [13]. В работе приводятся количественные оценки связи осадков с интенсивностью фронта. Фронты рассчитывались на разных высотах, с использованием данных по температуре, ветру и геопотенциалу. Основной вклад в производство осадков вносят фронты на поверхности 850 гПа.

Для прогноза осадков в этот период года в качестве предикторов конвективной неустойчивости в [35] диссертантом было предложено использовать потенциальный вихрь в средней тропосфере (на изобарической поверхности 500 гПа) и эквивалентно-потенциальный вихрь в нижней тропосфере (на изобарических поверхностях 925 - 850 гПа). В [74, 75] для определения степени динамического вынуждения и направления вертикальной скорости рассматривается возможность использования дивергенции Q -вектора (подробнее об этом в Гл. 2). Диагноз значений Q -вектора, в качестве метода оценки квазигеострофического вынуждения, применяется с конца 1970-х годов [74]. В настоящее время в ряде зарубежных метеослужб для прогноза осадков используется оперативный анализ полей дивергенции Q -вектора. В работе [74] для прогноза зимних конвективных осадков предлагается на разных уровнях в нижней тропосфере рассчитывать функцию PVQ , включающую в себя дивергенцию Q -вектора и эквивалентно-потенциальный вихрь в состоянии насыщения, а затем полученные карты сопоставлять с картами влажности и температуры.

Современные гидродинамические модели атмосферы имеют в выходной информации прогнозы осадков, в том числе и конвективных. Наиболее известными являются следующие модели: модель Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), модель GFS Вашингтон (США), модель UKMO Лондон (Великобритания), DWD (Метеорологический центр ФРГ), GSM (Япония). Модель ПЛАВ разработана в Институте вычислительной математики РАН, применяется в Гидрометцентре России в качестве оперативной [9]. Негидростатическая мезомасштабная модель COSMO, разработана консорциумом европейских стран.

В Гидрометцентре России регулярно проводится оценка успешности прогнозов выходной информации гидродинамических моделей, выходная информация которых поступает по

Глобальной сети телесвязи Всемирной метеорологической организации (ГСТ ВМО) или рассчитывается в Главном вычислительном центре Росгидромета [7, 8].

В прогнозах осадков оценивается факт наличия/отсутствия осадков по известным критериям: общая оправдываемость, оправдываемость прогноза наличия осадков и отсутствия осадков, предупрежденность случаев с осадками, без осадков и критерии надежности. В 2020 г. при оценке успешности прогнозов осадков в холодный период лучшие результаты показала модель DWD. В частности, при прогнозе на 18 ч. критерии Багрова и Пирси - Обухова составили 0.49 и 0.54 соответственно (<http://method.meteorf.ru/>).

1.3 Методы прогноза шквалов

Шквал по определению Всемирной метеорологической организации (ВМО) - увеличение скорости ветра более чем на 8 м/с в течение нескольких (от 3 до 20) секунд с сохранением минимальной скорости ветра 11 м/с в течение одной минуты. Продолжительность шквала обычно не превышает нескольких минут, но иногда шквал может длиться десятки минут. Согласно [22], существующая наблюдательная сеть метеорологических станций России регистрирует всего около 10% от общего количества шквалов. Многие случаи шквалов остаются, таким образом, незамеченными. На Рис. 3 представлен график (www.izmiran.ru) изменения приземного давления во время известного случая шквала в Москве 21 июня 1998 г.



Рис. 3. Изменение давления 20-21 июня 1998 г. во время прохождения шквала в Москве.

Перед прохождением шквала давление падает, при шквале резко растет, затем, по окончании шквала опять происходит резкое падение давления – «грозовой нос» на барограмме. При прохождении шквала также происходит падение температуры. 29 мая 2017 г. при

прохождении шквала в Москве температура упала более чем на 10 градусов всего за 12 минут: с 25,0 °C в 15.39 до 15.2 °C в 15.51 и 14,9 °C в 15.52 [34]. Этот случай подробно описан в Гл. 5.

Методы прогноза шквалов тесно связаны с прогнозом интенсивной конвекции [25]. В настоящее время методы прогнозов шквалов разделяются на

- статистические, полученные в результате статистической обработки многолетних рядов наблюдений, с последующим регрессионным или дискриминантным анализом. Эти методы в основном рассчитаны на применение на определенной территории.
- физико-статистические, в основе которых находятся физические принципы развития активной конвекции и образования шквалов.
- синоптические, в основном использующие данные о стратификации атмосферы.

Перечислим эти методы.

Методы Г. Д. Решетова [26].

1. Метод разрабатывался для прогноза шквалов с заблаговременностью до 24 ч. Предполагается, что перед расчетом прогноза дежурный синоптик анализирует синоптическую обстановку, определяя имеются ли благоприятные для развития шквалов условия: холодные фронты или волновые возмущения фронтов, центры циклонов. Наряду с благоприятными условиями для развития шквалов, известны неблагоприятные, при которых шквал, как правило, не развивается. В случае, если условия благоприятны для образования шквалов, рассчитываются предикторы: 1) $\Delta T_{\text{макс}}^{0^{\circ}\text{см}}$ – разность между максимальной температурой у поверхности земли перед грозовым дождем и температурой θ_{0w} – нисходящего потока. Эта температура равна нулевой температуре смоченного термометра, приведенной адиабатически к поверхности земли. 2) Разность между максимальной приземной температурой и температурой на поверхности 500 гПа: $\Delta T_{\text{макс}}^{500} = T_{\text{макс}} - T_{500}$.

Дискриминантная функция имеет вид:

$$L_1 = 0,055 \Delta T_{\text{макс}}^{0^{\circ}\text{см}} + 0,029 \Delta T_{\text{макс}}^{500} - 1,511. \quad (18)$$

2. Для второго способа шквалов по методу Решетова предикторами являются: сумма отклонений кривой стратификации от кривой состояния на поверхностях 850, 700, 600, 500 гПа, а также $\Delta T_{\text{макс}}^{500}$. В этом способе дискриминантная функция:

$$L_2 = 0,039 \sum_{850}^{500} (T' - T) + 0,025 \Delta T_{\text{макс}}^{500} - 1,162. \quad (19)$$

При положительных значениях L_1 и L_2 следует ожидать шквал.

Метод Б. Е. Пескова и А. И. Снитковского [26]

Метод разработан для прогноза шквалов со скоростями ветра более 21 м/с, главными предикторами этого метода являются мощность облака, средняя скорость ветра в слое от поверхности земли до 500 гПа и толщина облака между уровнем конденсации и уровнем изотермы -10°C . Рекомендуется учитывать синоптическую ситуацию перед расчетом прогноза шквалов. Благоприятные условия для развития шквалов – прохождение холодного фронта или фронта окклюзии.

Метод П. Г. Пантелеева [26]

Этот метод основан на определении зависимости повторяемости шквалов от степени конвективной устойчивости, барических тенденций и разности температур на фронте. Синоптическая ситуация, благоприятная для возникновения шквалов – вторая половина дня и прохождение фронта, на котором ожидается гроза. Порядок составления прогноза включает в себя изготовление прогностических кривых стратификации температуры и точки росы, по которым прогнозируется максимальная температура воздуха и точка росы. Строится прогностическая кривая состояния для расчета максимальной скорости конвективного потока по методу Н. И. Глушковой. После определения по картам барической тенденции и разности температур на фронте, составляется прогноз по графику [26]. На графике отложены по осям значения предикторов – конвективная скорость, максимальная температура, барическая тенденция, дефицит точки росы.

Метод Фобуша – Миллера [26]

Этот метод был разработан для прогноза внутримассовых шквалов. Предикторами в этом методе являются нулевая температура смоченного термометра и максимальная дневная температура. В методе Фобуша-Миллера скорость ветра при шквале считается пропорциональной разности максимальной температуры и нулевой температуры смоченного термометра.

Р. А. Ягудин модифицировал метод Фобуша – Миллера, предположив, что воздушные частицы опускаются влажноадиабатически в области ливня. Ягудин предложил внести изменения, уменьшив наклон линии регрессии. Вместо нулевой температуры смоченного термометра, он предложил использовать температуру, которая определяется по влажной адиабате, опускающейся из точки на уровне конденсации до уровня земли. Кроме этого, Ягудин сформулировал условия отсутствия шквала [26]:

- устойчивый слой восточного переноса в нижнем слое атмосферы;
- максимальная температуры у земной поверхности не выше 19°C и массовая доля водяного пара меньше 6% , дефицит точки росы меньше 7°C или больше 17°C ;
- уровень конденсации выше 780 гПа;

- атмосферное давление на уровне станции выше 1010 гПа;
- грозовой очаг проходит до наступления максимального развития конвекции.

Метод А. А. Алексеевой [5]

Автоматизированный метод прогноза сильных шквалов внедрен в оперативную практику Гидрометцентра России [5]. Этот метод является результатом использования прогноза ветра при шквале и альтернативного прогноза шквалов в градации опасных явлений. Максимальная скорость при шквале прогнозируется методом, разработанным совместно с Б. Е. Песковым:

$$Vm = aW_{max}^{1/n}[(|V|_{700}^{500} + b)(\nabla^2 p_{300} + c)]^{1/m} + d(|V|_{700}^{500} + g)^{1/k} + f|V|_{700}^{500} - CC, \quad (20)$$

где W_{max} – конвективная скорость, V – модуль средней векторной скорости ветра в слое 700 – 500 гПа, $\nabla^2 P_{300}$ – лапласиан приземного давления (гПа/300 км), a, b, c, d, g, f, CC – эмпирические коэффициенты, меняющиеся в зависимости от периода сезона.

Прогноз шквалов в градациях ОЯ осуществляется по дискриминантной функции:

$$L = F(W_{max}, \nabla^2 P_{300}). \quad (21)$$

В [5] был также рассмотрен предиктор – фактор фронта, благодаря которому удалось снизить количество ложных тревог.

В [6] А.А. Алексеева показывает, что наиболее информативным предиктором из рассмотренных ею, при прогнозе шквалов является максимальная конвективная скорость. Лапласиан приземного давления, отражающий циклоничность у поверхности земли и конвергенцию потоков, необходимых для подъема воздуха вверх, является вторым по важности предиктором. Третьим предиктором является модуль средней векторной скорости ветра в слое 700 – 500 гПа.

Метод Е. В. Васильева [14]

Исследовались следующие предикторы: максимальная конвективная скорость, лапласиан приземного давления, разность температур кривой стратификации и состояния на уровнях 850 и 500 гПа, разность температур воздуха на поверхностях 850 и 700 гПа, а также скорость ветра на земле при шквале.

Метод Э. В. Переходцевой [20]

Гидродинамико-статистический метод прогноза сильных ветров (> 20 м/с) с заблаговременностью 12, 24 и 36 ч. В этом методе используется расширенная совокупность предикторов, оказывающих влияние на возникновение шквалов. Наиболее информативными предикторами, выбранными по расстоянию Махалобиса были признаны: значение скорости ветра на уровне 700 гПа, уровень нулевой изотермы, разность между значением влажной адиабаты и

кривой стратификации на уровне 500 гПа, значение максимальной температуры на уровне земли, максимальная разность между температурой на фронте на уровне земли в радиусе 250 км от пункта прогноза.

Использование изэнтропического анализа и полей изэнтропического потенциального вихря способно оказать помощь в определении зон глубокой влажной конвекции и идентификации линии шквалов [50, 58].

В [50] утверждается, что при образовании линия шквалов всегда возникает обширная положительная аномалия потенциального вихря в средней тропосфере. Эта аномалия находится над холодным воздухом, образовавшимся благодаря испарению влаги вблизи поверхности земли и под теплым воздухом в средней тропосфере, образовавшимся благодаря выделению скрытой теплоты конденсации.

В [66, 72] при теоретических исследованиях потенциального вихря в масштабе мезо-γ, выдвигается гипотеза, что развитие линии шквалов связано с определенным балансом между величиной вертикального сдвига ветра и массы холодного воздуха, который образуется у поверхности земли посредством нисходящего потока. От соблюдения этого баланса зависит время жизни линии шквалов [72].

Сдвиг ветра играет важную роль в организации конвективного шторма [60]. Согласно [44], абсолютное значение диполей потенциального вихря в тропосфере при глубокой влажной конвекции тем больше, чем больше вертикальный сдвиг ветра в слое 0 – 6 км, а ориентация этих горизонтальных диполей параллельно направлению сдвига ветра.

Выводы

1. Большинство методов прогноза конвекции основано на прямом или косвенном определении энергии неустойчивости. Однако, следует отметить, что трудность в точном определении начала конвекции состоит в том, что присутствие энергии неустойчивости не является достаточным условием инициализации конвекции.
2. Методы прогноза интенсивных осадков в холодное время в подавляющем большинстве основаны на определении конвективной неустойчивости, хотя исследования утверждают, что в холодный период лишь в 9% случаев конвекция происходит в результате разрешения конвективной неустойчивости, а в 67% - в результате условной симметричной неустойчивости [65].
3. Шквалы, особенно самые сильные, происходят на холодных фронтах. Однако, нет ни одного автоматизированного метода прогноза шквалов, в котором присутствовал бы расчет фронтальных зон.
4. Присутствие аномалии потенциального вихря синоптического масштаба в средней или нижней тропосфере является признаком глубокой влажной конвекции.

5. В условиях глубокой влажной конвекции в бароклинной зоне и в присутствии сдвига ветра в слое 0 – 6 км образуются горизонтально ориентированные диполи – пары положительных и отрицательных аномалий потенциального вихря масштаба мезо-γ вокруг восходящего конвективного потока. Отслеживание эволюции этих диполей способно оказать помощь в решении задач наукастинга при прогнозировании опасных и неблагоприятных явлений погоды, возникающих при глубокой влажной конвекции.

Глава 2

Компьютерная технология изэнтропического анализа для краткосрочного прогноза погоды в оперативном режиме

2.1 Исследование атмосферных процессов с помощью изэнтропического анализа

На поверхности с постоянной потенциальной температурой $\theta = T(1000/P)^\kappa$ также постоянна и энтропия, которая определяется как $\phi = c_p \ln \theta + const$, где T – температура воздуха, P – давление, $\kappa = R/C_p = 0.286$, R – газовая постоянная, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Способ представления данных различных метеорологических полей с использованием потенциальной температуры в качестве вертикальной координаты называется изэнтропическим анализом. Исследование процессов в атмосфере с помощью изэнтропического анализа известно с 30-х годов прошлого века. Однако, в силу ряда причин, этот способ не применялся так широко, как анализ метеорологических параметров на стандартных изобарических поверхностях. Основная трудность применения изэнтропического анализа состоит в том, что наклон изэнтропических поверхностей к горизонтали примерно в 30 раз превосходит наклон изобарических поверхностей [19]. Поверхность Земли нельзя считать изэнтропической даже приближенно.

Изготовление карт изэнтропического анализа было практически невозможно без быстроскоростных компьютеров, кроме того, для выбора нужной изэнтропической поверхности, высота которой меняется в зависимости от времени года и широты, требовалось организовать удобный интерфейс с пользователем. Поэтому, только в 90-х годах прошлого века, с созданием персональных компьютеров появились первые приложения для метеорологов, позволяющие оперативно рассчитывать метеорологические параметры на изэнтропических поверхностях.

Возврат к давно известному, но практически не применяемому способу представления метеорологических величин произошел из-за того, что в динамической метеорологии синоптического масштаба использование изэнтропического анализа с привлечением полей вертикальной составляющей потенциального вихря Эртеля, позволяет исследовать атмосферные процессы различной природы более детально, по сравнению с традиционными методами. Главным преимуществом изэнтропического анализа по сравнению с изобарическим является возможность более удобного и наглядного учета трехмерности некоторых атмосферных процессов.

В p -системе, при анализе метеорологических параметров на изобарической поверхности трехмерность можно учесть, нанеся на карту значения вертикальных скоростей. Однако,

отслеживание адвекции воздушных масс на изобарической поверхности, может привести к ошибочным результатам из-за того, что в реальной атмосфере траектории воздушных частиц лежат в изобарической плоскости только при равенстве нулю вертикальных скоростей. При соблюдении адиабатичности в модели, движение воздушных частиц происходит по изэнтропическим траекториям, т. е. горизонтально в θ – системе координат.

Процессы в реальной атмосфере в точности адиабатическими, несомненно, не являются. В подавляющем большинстве случаев, однако, обоснованным, [29], является предположение, согласно которому при рассмотрении процессов в течение 1 - 2 суток перемещение частиц в тропосфере является почти адиабатическим, поэтому с приемлемой погрешностью изэнтропические поверхности (в отличие от изобарических) можно рассматривать как материальные. Проводя траектории на изэнтропической поверхности, можно следить за перемещением индивидуальных частиц. Разность давлений в начальной и конечной точках траекторий показывает изменение давления в индивидуальной частице, т.е. вертикальное смещение со временем частицы в p -системе координат.

Отслеживание перемещения потоков влаги по изэнтропическим траекториям дает более точную и плавную картину, по сравнению с традиционным изобарическим анализом [40, 67], что позволяет предположить, что изэнтропический анализ может обеспечить более успешное прогнозирование осадков синоптиком, чем изобарический анализ. В работе [40] представлен вертикальный разрез атмосферы, на котором изображены две пересекающиеся поверхности - изобарическая p и изэнтропическая θ (Рис. 4) . Синоптик, анализирующий карты с такой ситуацией, видит непрерывное перемещение влажного воздуха по изоповерхности $\theta = \text{const}$ с юга на север, однако, на поверхности p в моменты времени t_1 и t_3 области с влажным воздухом нет, эта область вдруг возникает на поверхности p только в момент времени t_2 и затем опять исчезает без видимой причины.

С целью определения оценки зависимости переноса влаги по направлению изэнтропического ветра, был проведен, по предложению В. А. Гордина эксперимент по методике [3]. Область проведения исследований – Европа. В качестве информации использовались данные ECMWF за июнь – июль 2020 г. с разрешением 0,25 градуса за сроки 0 и 12 ч ВСВ.

Строились корреляционные функции зависимости изменения влажности от расстояния, измеряемого по направлению ветра, против ветра и в направлении, ортогональном направлению ветра, на изэнтропической поверхности 300К (900 – 700 гПа). Для сравнения, были определены корреляционные функции для изобарической поверхности 850 гПа. Результаты эксперимента представлены на Рис.5.

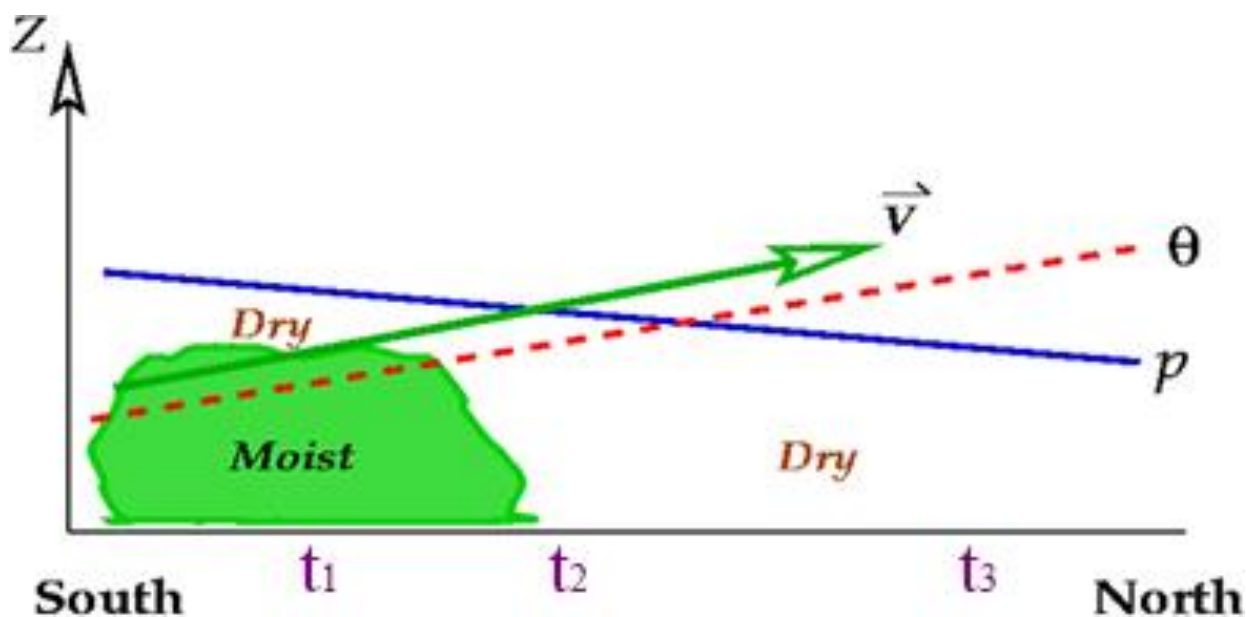


Рис.4. Схема перемещения влажного воздуха по изэнтропической траектории. При анализе поверхности p видно нарушение непрерывности потока влаги [40].

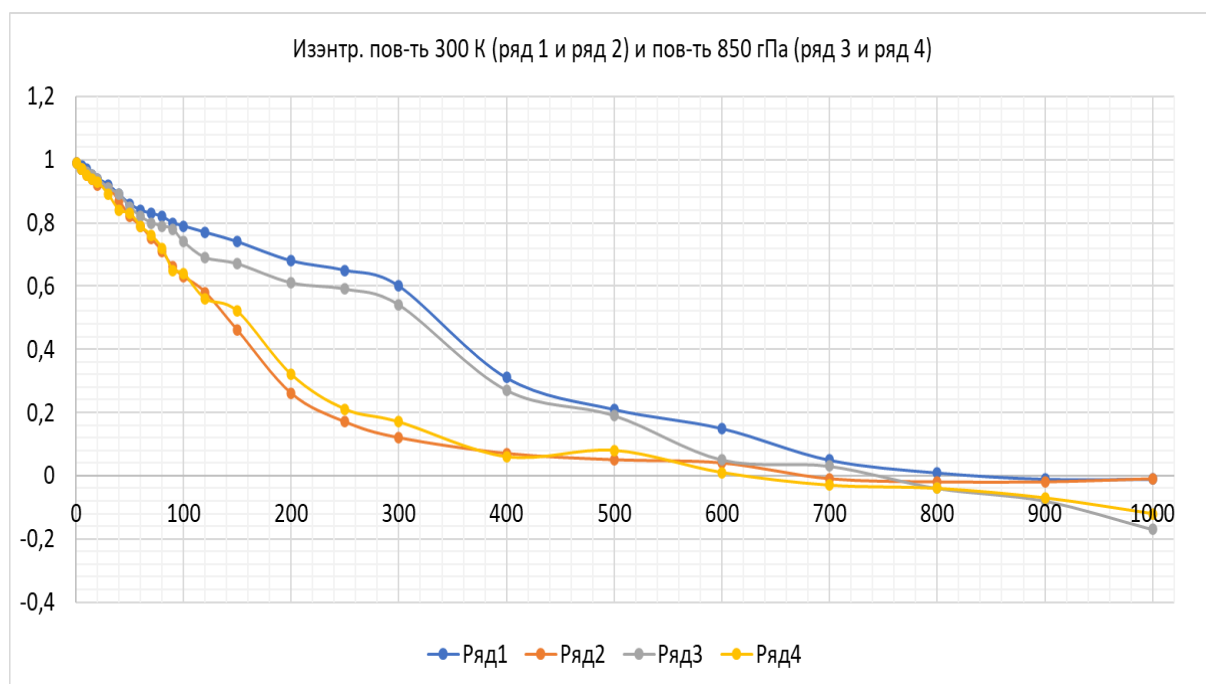


Рис.5. Корреляционные функции отклонения влажности от расстояния по ветру и в ортогональном направлении. Изэнтропическая поверхность 300К (синий и красный), изобарическая поверхность 850 гПа (серый и желтый).

На Рис.5 видна сильная корреляционная зависимость влажности от перемещения по ветру на расстояние до 100 км. При этом, видна существенная разница значений корреляционных функций для изэнтропической поверхности 300К и изобарической поверхности 850 гПа, что подтверждает предположение, высказанное выше о том, что изэнтропический анализ

больше подходит для прогноза осадков, чем изобарический анализ.

Изэнтропические карты потенциального вихря обладают хорошей разрешающей способностью, на них четко прослеживается роль горизонтальной адвекции воздушных масс в формировании особенностей погоды. Потенциальный вихрь на изэнтропических поверхностях ведет себя как квазилагранжева характеристика, поэтому эти карты являются идеальным подспорьем для “классического синоптика”, привыкшего мыслить в терминах процессов трансформации индивидуальных воздушных масс [19].

Изэнтропический анализ не заменяет традиционный (изобарический) способ исследования явлений погоды, но может существенно дополнить его, позволяя по-другому посмотреть на процессы, происходящие в атмосфере, и в итоге помочь синоптику уточнить прогноз. Согласно [69], метеорологи в настоящее время обсуждают не сам факт необходимости изэнтропического анализа, а возможность сделать этот способ исследования атмосферных процессов удобным для использования в оперативной работе синоптиков.

2.2 Технология изэнтропического анализа в архитектуре АРМ синоптика.

Технология АРМ Синоптика была специально разработана для оперативной работы дежурных синоптиков. С помощью этой технологии можно автоматически изготавливать различные метеорологические карты, используя как фактические, так и любые прогностические данные, если они оформлены в соответствии с форматом Всемирной метеорологической организации [1]. Для реализации изэнтропического анализа был создан модуль пересчета данных из изобарических координат в изэнтропические. Для интерполяции полей по вертикали использовались кубические сплайны дефекта 1 (сплайны Шонберга) [2], принадлежащие пространству C^2 , с равенством нулю вторых производных в качестве краевых условий. Сплайн строился на отрезке по вертикали от 1000 до 100 гПа, с узлами на стандартных изобарических уровнях.

Кроме того, был создан интерфейс работы с пользователем, позволяющий в режиме диалога или автоматически, по расписанию, используя в качестве входной информации данные гидродинамических моделей (список моделей представлен в разделе 1.2), рассчитать на любой изэнтропической поверхности, различные метеорологические параметры:

- давление, влажность, геопотенциал, скорость и направление ветра. На Рис. 6 – 7 представлены примеры изображения некоторых параметров на изэнтропических поверхностях.
- мера статической устойчивости, которая обратно пропорциональна толщине слоя между двумя изэнтропическими поверхностями (в гПа) $\Delta P = P_n - P_v$, где P – давление на уровне изэнтропической поверхности, индексы означают соответственно верхний,

соответствующий θ_v и нижний уровень θ_n относительно земной поверхности. Значения потенциальной температуры можно выбирать интерактивно, с дискретностью 5 градусов (Рис. 8).

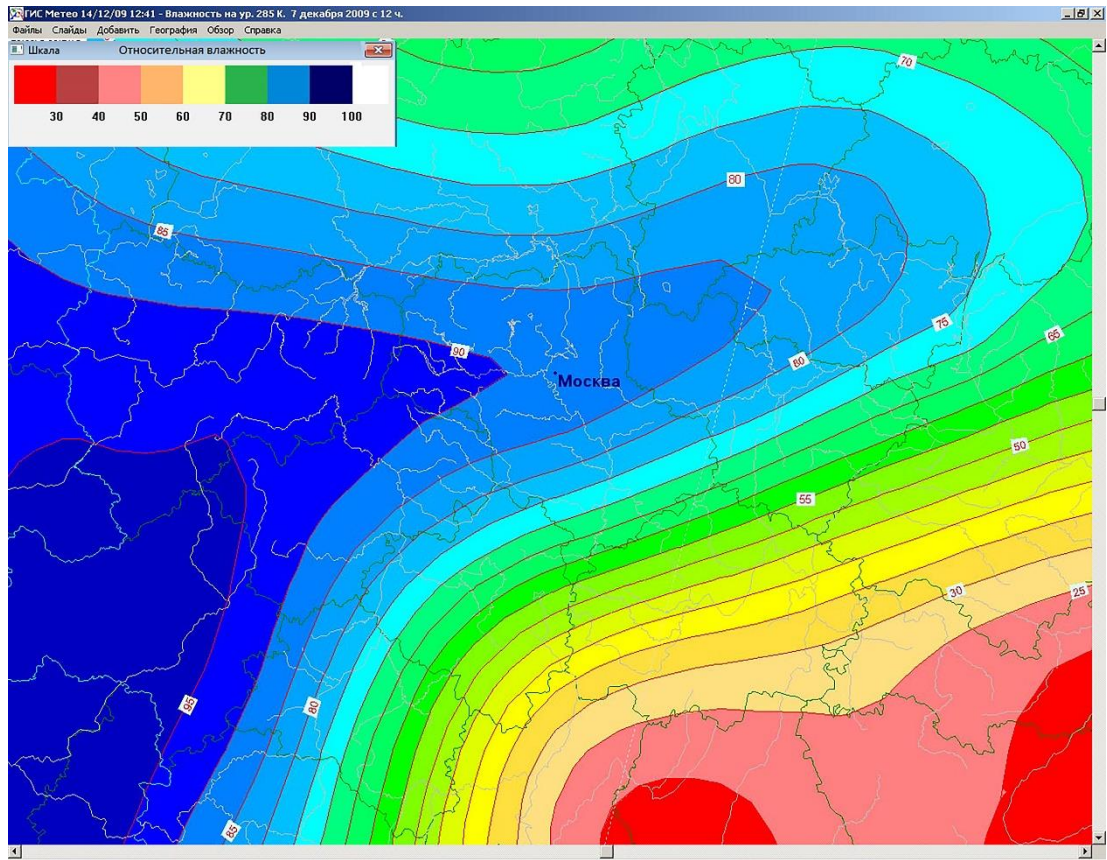


Рис.6. Относительная влажность на поверхности потенциальной температуры 285К.

- разность между давлением на изэнтропической поверхности и уровнем конденсации: $\Delta P = P - P_c$, где $P_c = P (T_c / T)^{C_p / R_d}$, P – давление в точке на изэнтропической поверхности, T – температура на изэнтропической поверхности, C_p – теплоемкость при постоянном давлении, R_d – газовая постоянная. T_c – температура на уровне конденсации определялась по температуре и относительной влажности по модифицированной формуле Магнуса [41], дающей минимальные ошибки в диапазоне температур от -35 до +35 °C: $T_c = \frac{c \gamma}{b - \gamma}$, где $\gamma = \ln \left(\frac{R}{100} e^{(b - \frac{T}{a})(\frac{T}{c + T})} \right)$, где R – относительная влажность в %, $a = 6.1121 \text{ mb}$, $b = 17.62$, $c = 243.12 \text{ °C}$, $d = 234.5 \text{ °C}$; Совместный анализ на карте изолиний ΔP и значений вертикальных скоростей дает наглядную картину для краткосрочного прогноза осадков: если вертикальные скорости превышают разницу между давлением на изэнтропической поверхности и давлением на уровне конденсации, то следует прогнозировать выпадение осадков (Рис. 7).

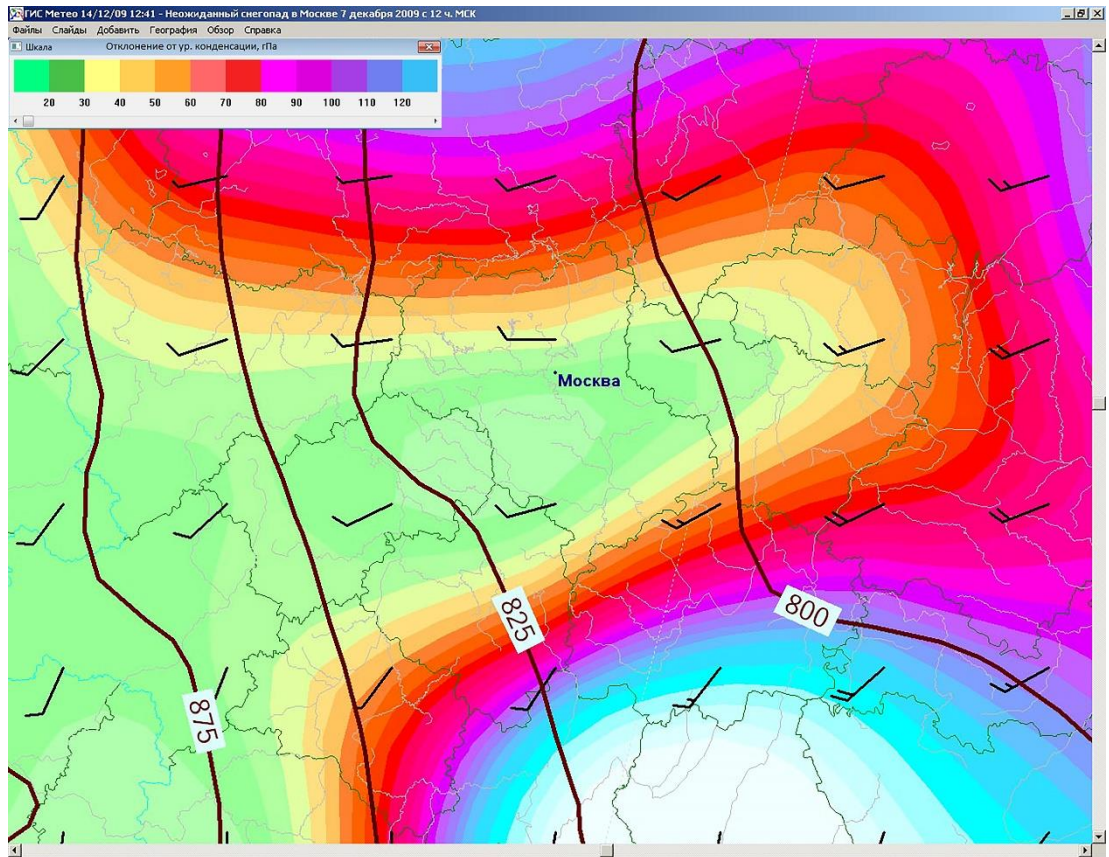


Рис. 7. Давление (изолинии), ветер и отклонение от уровня конденсации (зеленый цвет соответствует 25 гПа) на изэнтропической поверхности 285 К.

- абсолютный вихрь: $\Omega_a = \Omega + f$, где Ω - относительный вихрь $\Omega = \partial v_\theta / \partial x - \partial u_\theta / \partial y$, u_θ , v_θ – составляющие скорости вдоль осей X, Y на изэнтропической поверхности, f – параметр Кориолиса: $f = 2\omega \sin \varphi$, где ω - угловая скорость вращения Земли, φ - широта места;
- потенциальный вихрь: $PV = \Omega_a (-g \partial \theta / \partial P)$, где g – гравитационная постоянная, θ - потенциальная температура.

На Рис.9 представлено рассчитанное поле изэнтропического потенциального вихря на поверхности 300 К.

- эквивалентно-потенциальный вихрь: $PV_e = \Omega_a (-g \partial \theta_e / \partial P)$, где θ_e – эквивалентно-потенциальная температура [52]: $\theta_e = \theta \exp(\frac{Lq}{C_p T})$, где L – скрытая теплота парообразования, C_p , q – удельная влажность, T – температура на уровне конденсации;

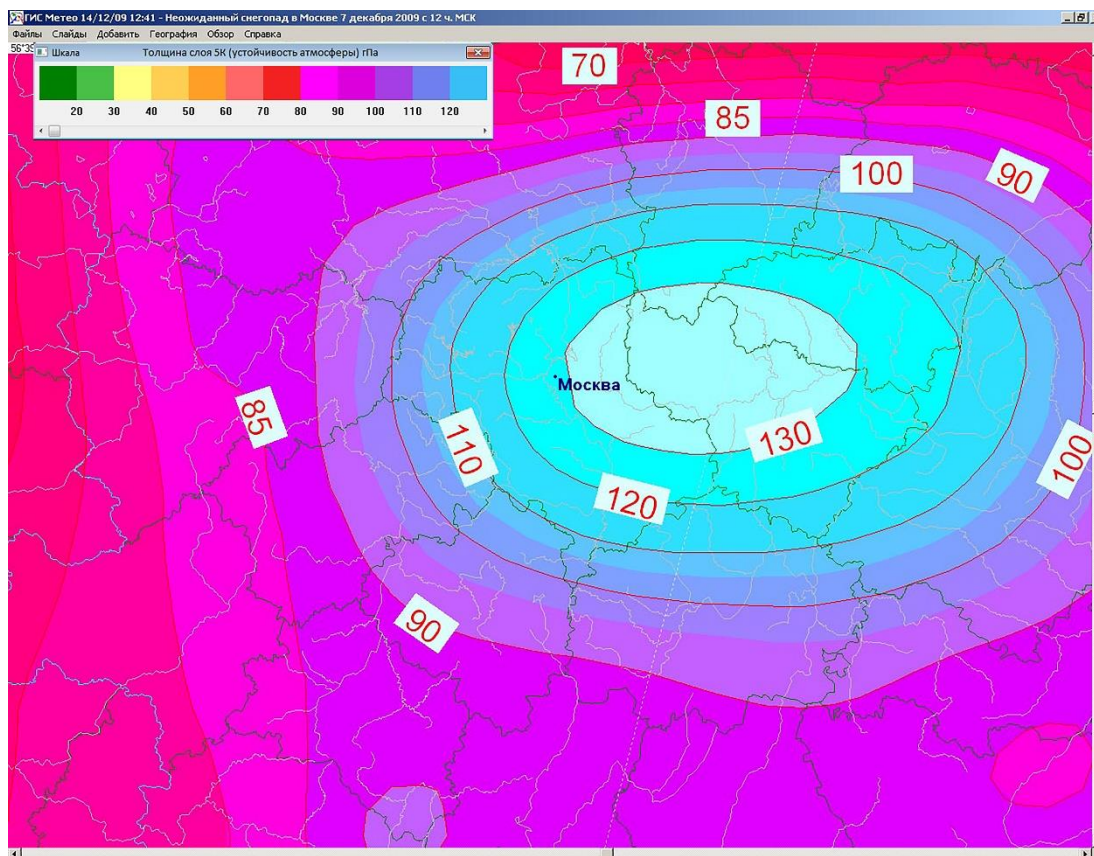


Рис. 8. Толщина слоя 285-280К – мера его статической устойчивости. В этом примере низкая устойчивость видна в районе Москвы, толщина слоя более 130 гПа.

- влажно-потенциальный вихрь: $PV_{es} = \Omega_a (-g \partial \theta_{es} / \partial P)$, где θ_{es} – эквивалентно-потенциальная температура в состоянии насыщения: $\theta_{es} = \theta \exp\left(\frac{Lq_s}{c_p T}\right)$, q_s – удельная влажность в состоянии насыщения. Потенциальный вихрь Эртеля является инвариантом в ненасыщенном воздухе. Для исследования атмосферы в состоянии насыщения, применяются влажно-потенциальный и эквивалентно-петенциальные вихри.

- вертикальные скорости в p -системе, которые рассчитываются как разности давлений начальной и конечной точек траекторий, лежащих на одной изэнтропической поверхности, поделенные на время, затраченное на прохождение траекторий. На Рис. 10 представлено поле вертикальных скоростей на изэнтропической поверхности 290 К.

Кроме того, производится расчет на поверхностях равного значения потенциального вихря следующих параметров: потенциальной температуры, геопотенциала, давления (Рис. 11), абсолютного вихря. Созданное диссертантом программное средство позволяет наносить перечисленные выше элементы в виде изолиний, цветного поля или значений в узлах сетки на карту, представляющую из себя любую часть территории Земного шара.

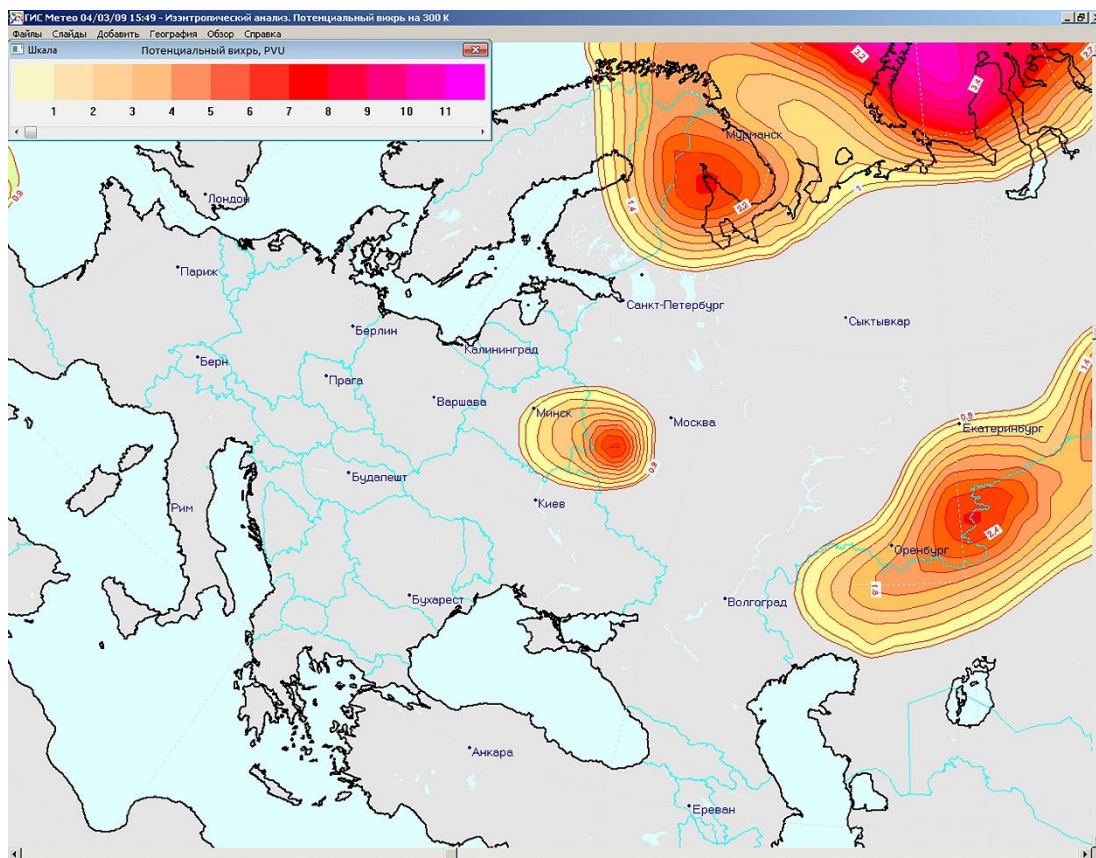


Рис.9. Поле изэнтропического потенциального вихря на поверхности 300К.

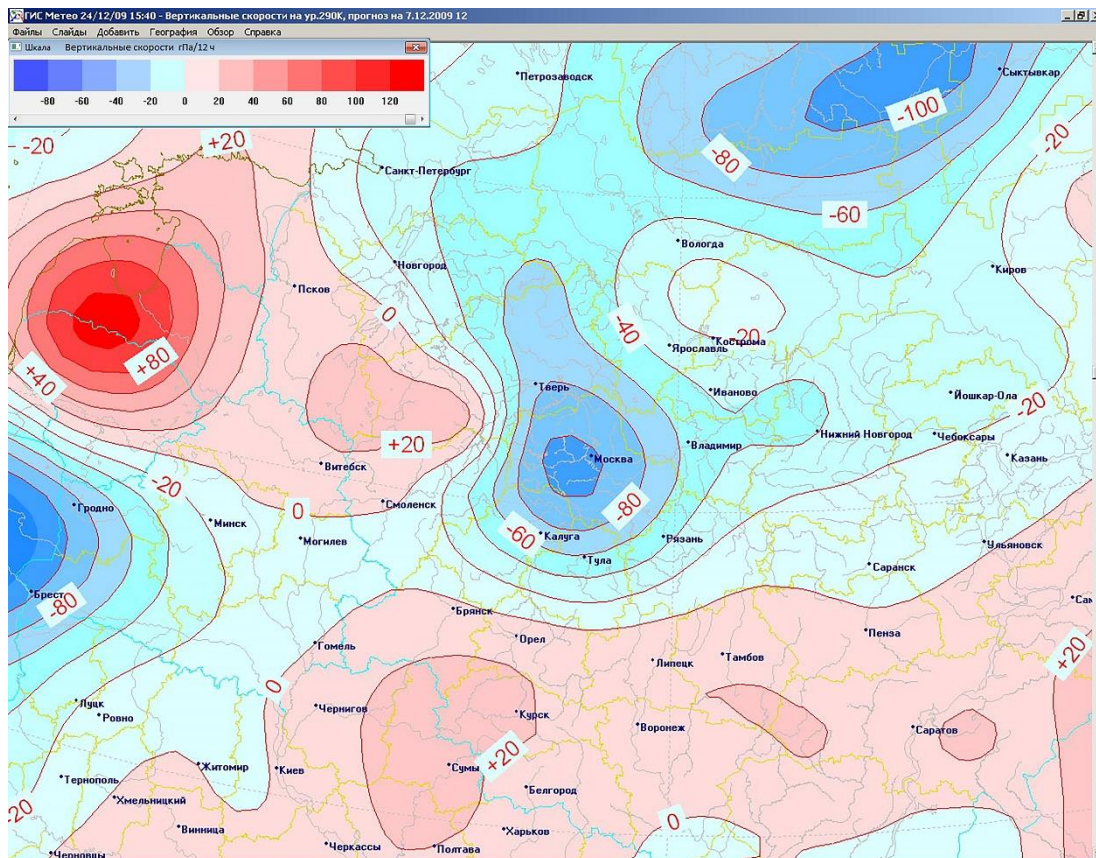


Рис. 10. Вертикальные скорости на поверхности 290К.

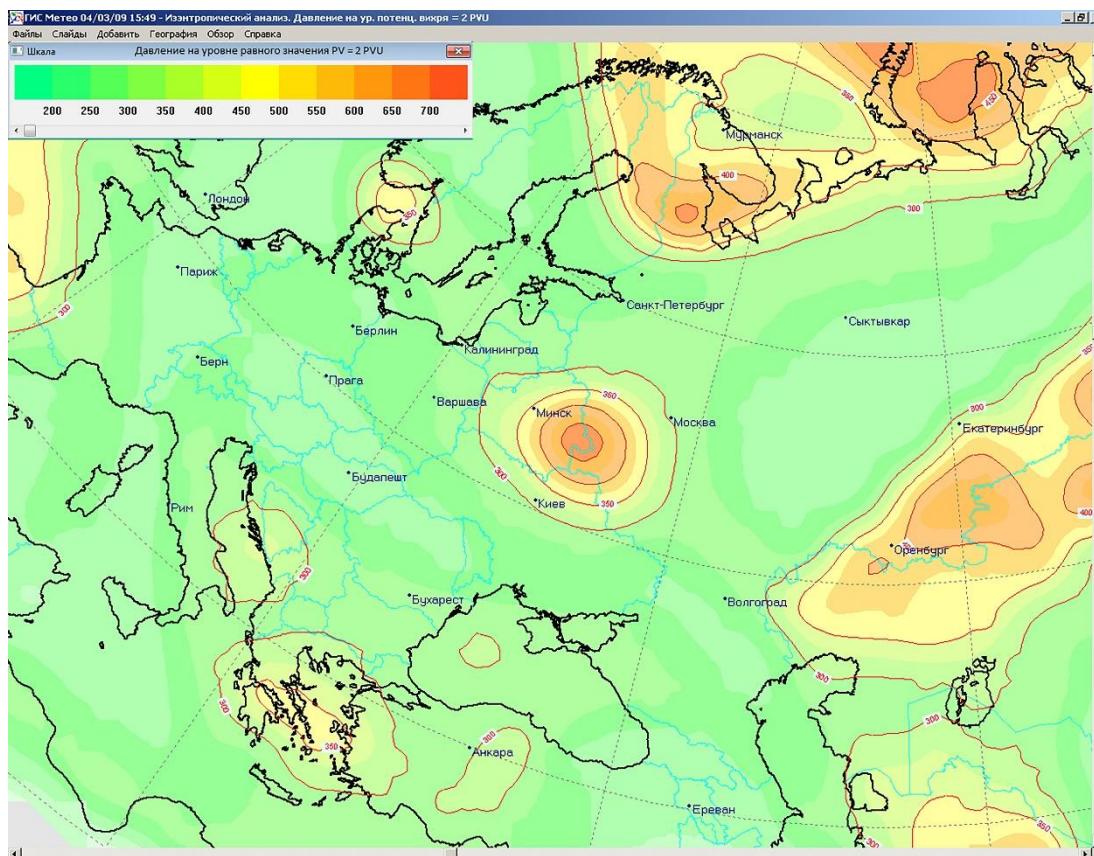


Рис. 11. Давление на уровне потенциального вихря равном 2 PVU (на уровне, близком к динамической тропопаузе).

2.3 Изэнтропические траектории

Использование траекторных расчетов имеет широкий круг приложений в синоптической практике [10]. При этом в большинстве применяемых методик предусматривается расчет лишь “плоских” (двухмерных) изобарических траекторий на разных уровнях атмосферы. Такой подход имеет, по крайней мере, два существенных ограничения.

Одно из них связано с тем, что не принимается во внимание изменение горизонтальных скорости и направления перемещения реальной частицы при ее переходе с одного уровня на другой, где поток может существенно отличаться от потока на исходном уровне (например, при выходе частицы из пограничного слоя в свободную атмосферу или наоборот). В результате моделируемая проекция перемещения частицы на горизонтальную плоскость может заметно отличаться от действительной. В [10] нами показано, что при некоторых синоптических ситуациях различия между траекториями могут быть весьма существенными.

Другое новое качество, которое может быть получено в рамках модели трехмерных траекторий, состоит в возможности более точной оценки ожидаемого изменения температуры и влажности в пункте. Как было доказано в процессе эксперимента, приведенного в первом

параграфе Гл. 2, изэнтропические траектории дают более точную и плавную картину перемещения области с повышенной влажностью.

Рассчитанные поля вертикальной скорости вместе с горизонтальными траекториями воздушных частиц являются важными “рабочими инструментами” синоптика – прогнозиста. Однако согласованное использование этих двух видов данных требует определенного навыка, т. е. зависит от мастерства синоптика. Поэтому, при работе с изобарическими траекториями, синоптику приходится помнить и о вертикальном перемещении частицы. Изэнтропические траектории позволяют получить синоптику в рамках одного “объекта” информацию о вертикальном и о горизонтальном перемещении частицы, объективизируя использование этих данных и сокращая затраты времени для принятия решений (в первую очередь - при прогнозе температуры и влажности). Работа с изэнтропическими траекториями происходит на одной изэнтропической поверхности.

Созданная технология является дополнением к оперативно действующей разработанной нами системе изобарических трехмерных траекторных расчетов [10].

Методика расчета обеспечивает диагностический и прогностический расчет траекторий, имеющих как прямое, так и обратное направление по отношению к движению частиц. Расчет траекторий может производиться в окрестности любого пункта Земного шара на различных уровнях изэнтропических поверхностей. Для получения переносящего потока могут быть использованы анализы и прогнозы полей ветра, полученные по различным гидродинамическим моделям и распространяемых в кодах ГРИБ или ГРИБ2. Допустимое время отслеживания траекторий ограничивается заблаговременностью и точностью результатов гидродинамических моделей.

Для получения трехмерных траекторий решаем уравнения

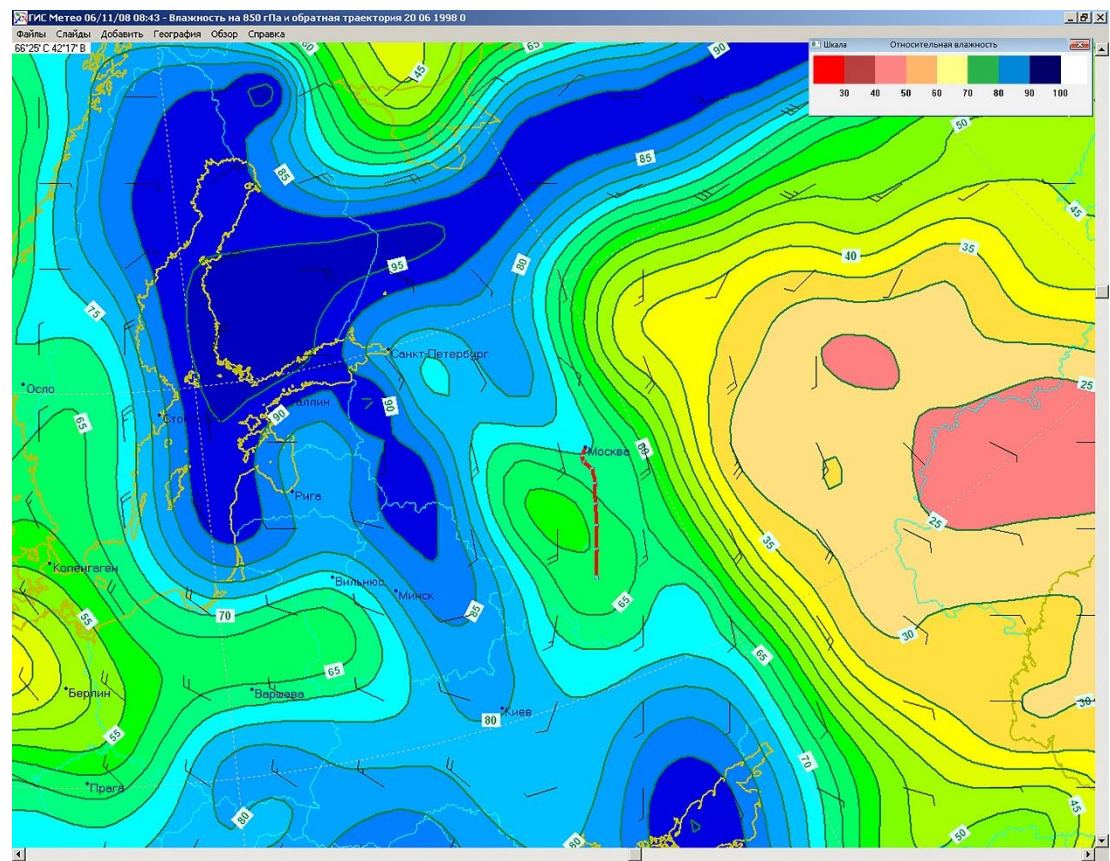
$$dx / dt = u (x, y, \theta, t), \quad dy / dt = v (x, y, \theta, t), \quad (22)$$

с условиями при

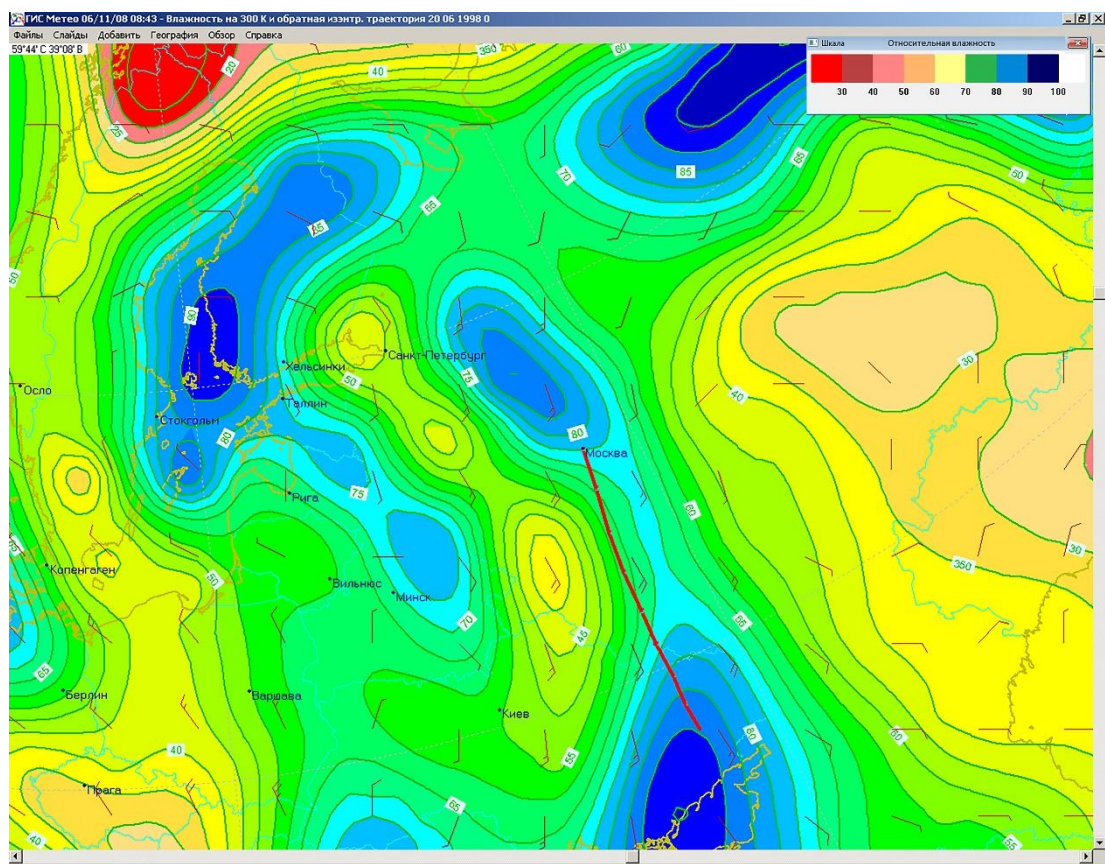
$$t = t_0 \quad x = x_0, \quad y = y_0$$

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = const. \quad (23)$$

Здесь $x(t)$, $y(t)$, θ - текущие координаты перемещающейся частицы; u , v – горизонтальные составляющие скорости переносящего потока, представленные на изэнтропической поверхности.



a)



б)

Рис. 12. Пример поля относительной влажности на уровне 850 гПа и обратная траектория на 24 ч (а). Поле относительной влажности на изэнтропической поверхности $\theta = 300$ К (900 - 700 гПа) и обратная изэнтропическая траектория на 24 ч (б).

Значения p определяются по заданному значению θ в момент времени t . В горизонтальной плоскости производится билинейная интерполяция компонент скорости, в вертикальной – интерполяция кубическими сплайнами.

При построении траектории выводится на экран компьютера информация о давлении, на котором находится в данный момент воздушная частица, и значение вертикальной скорости в p – системе координат.

$$\omega = (P_{n+1} - P_n) / \delta t. \quad (24)$$

Слой атмосферы, в пределах которого в программе допустим расчет траекторий, ограничен в нашем алгоритме уровнями P_0 (приземное давление) и 100 гПа. Для расчета переносающего потока привлекаются данные о u , v , T в точках сетки на стандартных изобарических уровнях, нескольких заблаговременностей. В технологии траекторных расчетов в качестве входной информации могут быть использованы данные любых гидродинамических моделей, передаваемой в кодах ГРИБ или ГРИБ2.

В примере, представленном на Рис.12, обратные траектории показывают существенную разницу в определении начальных точек траекторий. В первом случае в Москву придет масса относительно сухого воздуха, что, конечно, не может не привести к ошибке при прогнозе осадков. Во втором случае видно, что в Москву поступит воздух с влажностью, превышающей 90%, что и было подтверждено наблюдениями на станции.

2.4 Примеры практического использования оперативного изэнтропического анализа

2.4.1 Исследование синоптического процесса 7 декабря 2009 г.

7 декабря 2009 года в Москве и области на фоне высокого давления прогнозировалась погода без существенных осадков. Результаты расчетов гидродинамических моделей при прогнозе на 24 ч. давали небольшие осадки, которые в пересчете на сутки составили: модель NCEP Washington – около 1 мм, модель UKMO Exeter – 2.6 мм. Фактические осадки за сутки 7 декабря в Москве составили: на метеорологической станции 27619 (Тушино) - 11 мм, на станции 27612 (ВДНХ) – 8 мм. Сильный снегопад начался около 10 ч МСК и продолжался до полуночи. Метеорологическая карта за 12 ч. ВCB 7 декабря 2009 г. представлена на Рис. 13. На карте проведены изобары на уровне моря по данным станций наблюдений, а также осадки, выпавшие за сутки с 03 ч. ВCB 7 декабря – в виде цифр. Кроме того, на этой же карте нанесены прогностические изогипсы H500 по данным UKMO Exeter на 12 ч. ВCB 7 декабря 2009 г.

Анализ этих карт показал, что над Московским регионом формируется небольшая высотная депрессия, однако гораздо лучше это видно по картам изэнтропического анализа.

Согласно [19], изэнтропические карты потенциального вихря адекватны картам барической топографии, но более информативны за счет вклада статической устойчивости в поле потенциального вихря, что отражает связь метеорологических процессов, происходящих на различных уровнях. На Рис. 14 представлен прогноз на 24 ч. давления на уровне потенциального вихря равном 2 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ К кг}^{-1}$), в виде изолиний и значения эквивалентно-потенциального вихря на уровне 285К, в виде заштрихованной зоны, рассчитанных по данным UKMO Exeter за 12 ч. ВCB 6 декабря 2009 г. Изолинии давления на уровне PV = 2 представляют собой карту динамической тропопаузы, по которой видно, что над Московским регионом образовалась аномалия потенциального вихря. Другими словами, произошло вторжение стратосферного вихря в верхние слои тропосферы. Значение потенциального вихря равного 2 PVU в районе Москвы находилось на уровне 350 – 400 гПа.

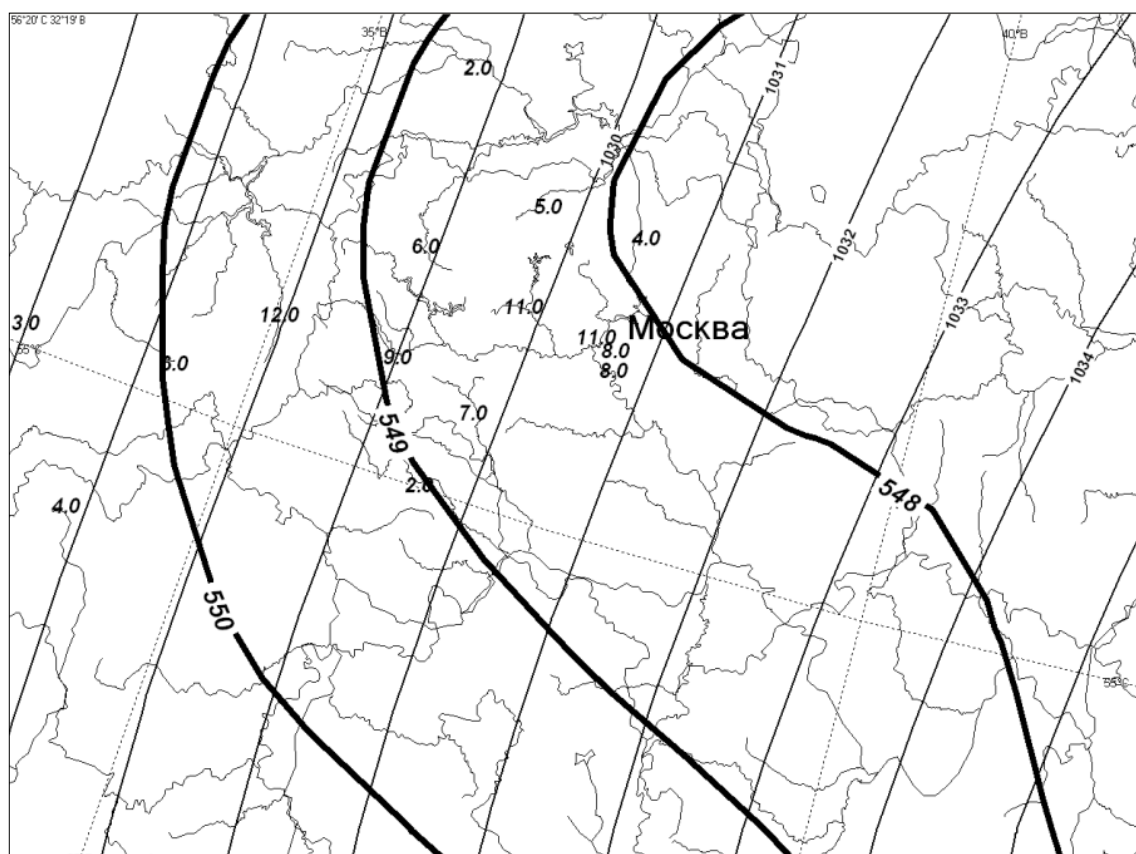


Рис.13. Поле давления на уровне моря (гПа; тонкие линии) и геопотенциала Н500 (дам; жирные линии) на 12 ч ВCB 7 декабря 2009 г. и суточных сумм осадков (мм; указаны цифрами у станций).

Согласно [54], локальный минимум тропопаузы является причиной вторжения стратосферного вихря в верхние слои тропосферы. При слабой устойчивости в тропосфере возмущение, вызванное стратосферным вихрем, может достичь нижних слоев тропосферы. Вихрь имеет циклоническую направленность, следовательно, в нижних слоях тропосферы также

создается циклоническое вращение, в результате которого возникают вертикальные скорости, направленные вверх, приводящие к осадкам, при наличии в нижних слоях тропосферы близкого к насыщению воздуха.

На Рис. 15 представлены: изолинии давления поверхности потенциальной температуры, равной 285K (это поверхность 900 – 800 гПа). Видно, что эта изэнтропическая поверхность имеет сильный наклон (на западе давление составляет 925 гПа, на востоке 825 гПа). Кроме того, на Рис.15 представлены значения ветра на поверхности 285K и закрашенная зона, представляющая собой значения в узлах сетки, где отклонение давления от уровня конденсации составляет менее 25 гПа.

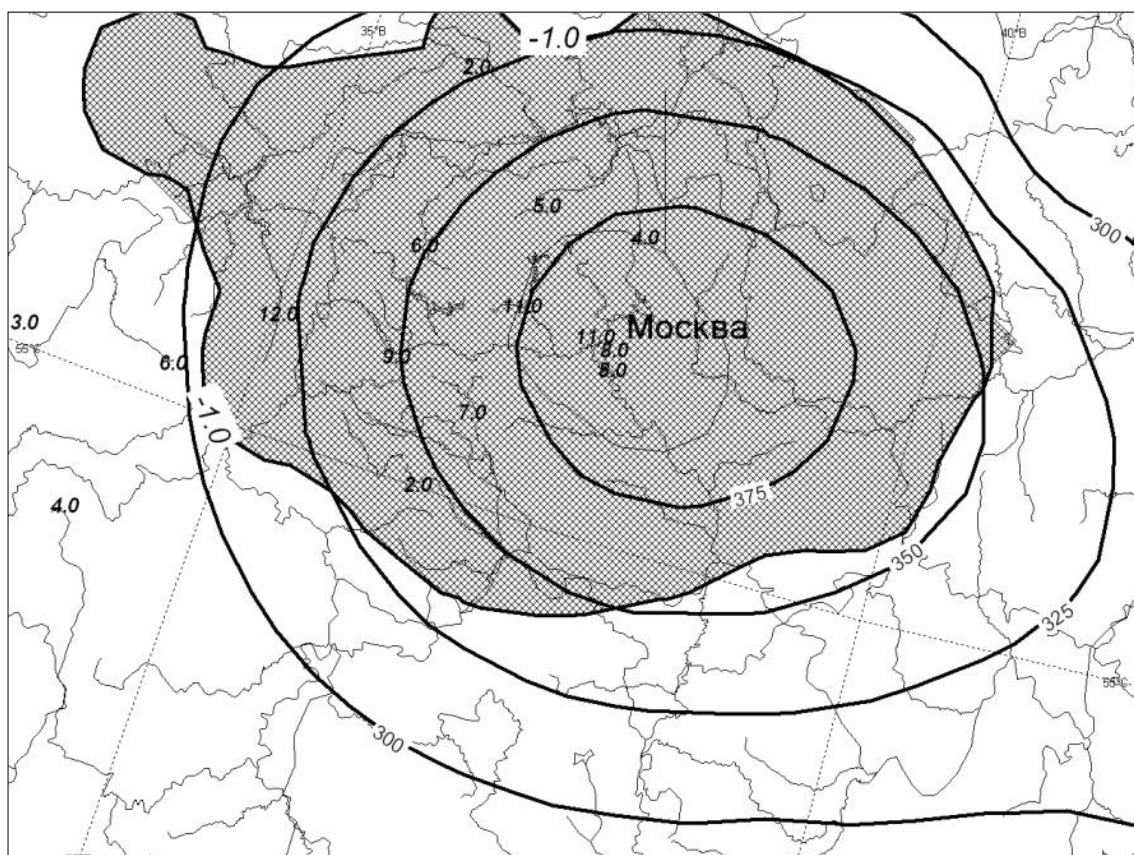


Рис.14. Прогноз на 24 ч по данным UKMO за 12 ч ВСВ 6 декабря 2009 г. поля давления (гПа; изолинии) на поверхности потенциального вихря 2 рви и эквивалентно-потенциального вихря на поверхности 285 К (область отрицательных значений заштрихована).

Очевидно, что воздушные частицы, двигаясь по направлению ветра, будут подниматься (относительно земли). Значения вертикальных скоростей ветра в районе Москвы приведены в Таблице 2. При превышении уровня конденсации, образовавшаяся влага выпадает в виде осадков. Можно посчитать количество осадков за 12 ч. пользуясь известной формулой для расчета обложных осадков [25]:

$$Q_{обл} = 1.5 \Delta q_{850} + 1.8 \Delta q_{700} + \Delta q_{500}, \quad (25)$$

где Δq – индивидуальные изменения массовой доли водяного пара в насыщенном воздухе при подъеме с соответствующих изобарических поверхностей. В этой же таблице приведены значения вертикальных скоростей, рассчитанных по методике, изложенной в нашей статье [10]. По этой методике вертикальная скорость рассчитывается по уравнению притока тепла с независимым добавлением вклада эффекта трения в пограничном слое.

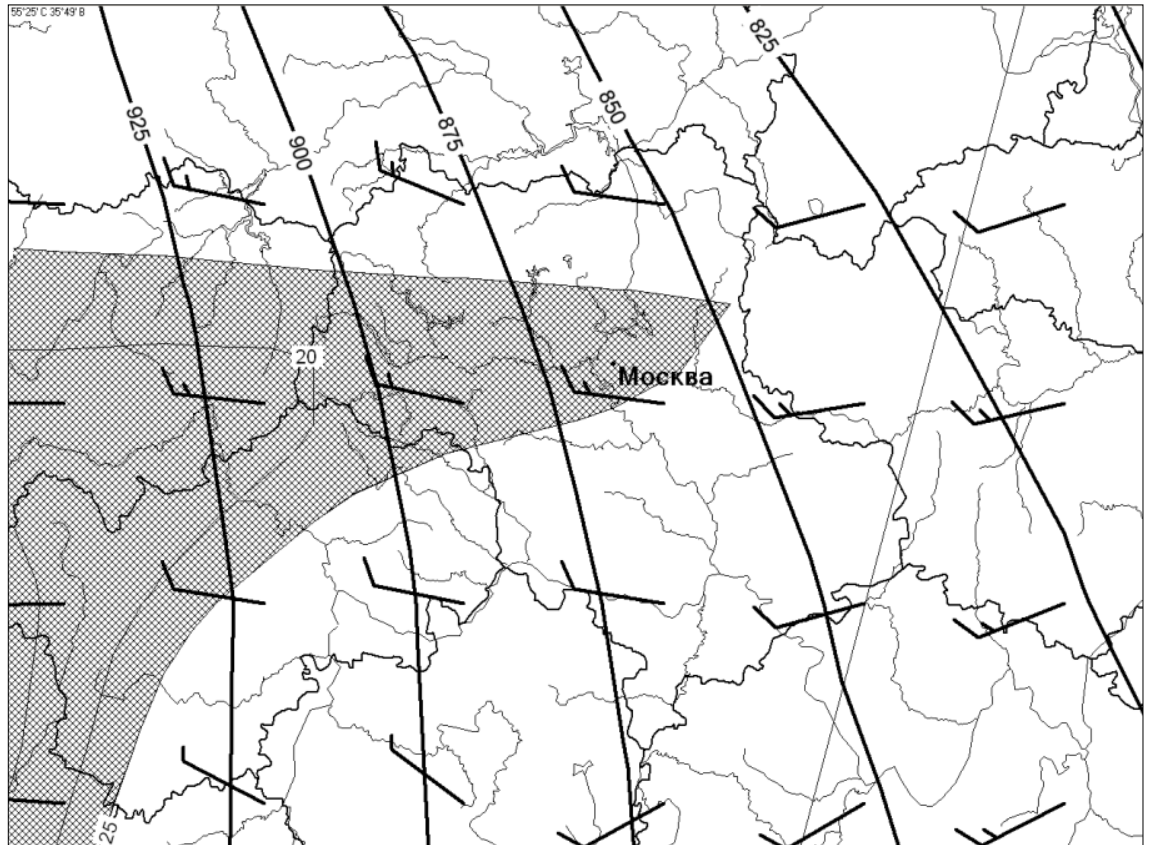


Рис. 15. Изэнтропический анализ на поверхности 285 К. Изолинии - давление ($гПа$), значками показаны скорость и направление ветра. Закрашена область, где отклонение давления от уровня конденсации меньше 25 $гПа$.

Рядом с вертикальными скоростями в таблице приведены в скобках соответствующие значения Δq . Сравнение значений количества осадков, проведенное диссертантом с использованием разных методов расчета вертикальных скоростей, подтвердило утверждение [29], что вертикальные скорости с использованием изэнтропического анализа определяются точнее.

Однако количество рассчитанных осадков все равно оказалось значительно меньше фактических осадков, зафиксированных на станции 27612.

Таблица 2. Вертикальная скорость в районе Москвы 7 декабря 2009 г. в 12:00 ВСВ, заблаговременность 24 ч.

Изобарическая поверхность, гПа	ω (Δq) гПа/12 ч по методике [10]	ω (Δq) гПа/12 ч по данным изэнтропического анализа
850	+15.5 (-)	-50.4 (1.5)
700	-25.6 (0.3)	-49.2 (1.3)
500	-43.0 (0.2)	-85.8 (0.5)
осадки за 12 ч. (мм)	0.74	5.09

Примечание. В скобках приведены изменения массовой доли водяного пара в насыщенном воздухе

Снегопад 7 декабря 2009 г. имел явный конвективный характер, поэтому диссертантом было проведено исследование неустойчивости в тропосфере. Проверка конвективной неустойчивости показала, что слои в нижней тропосфере устойчивы, то есть кривая состояния на всех уровнях лежит левее кривой стратификации, энергия неустойчивости отрицательная, перемещение частицы вверх по вертикали не происходит. Дальнейшее исследование показало присутствие условной симметричной неустойчивости [52, 60] над Московским регионом на уровнях 1000 – 700 гПа, благодаря которой произошло развитие влажной наклонной конвекции.

Согласно [52, 60], воздушная частица может быть устойчива в вертикальном и горизонтальном направлениях, то есть обладать конвективной (статической) и инерционной устойчивостью, но быть неустойчивой к наклонному смещению. Такой тип неустойчивости называется симметричной неустойчивостью. Термин "условная" означает, что воздушная частица рассматривается в состоянии насыщения [52, 60]. Согласно [52] симметричную неустойчивость можно рассматривать как изэнтропическую инерционную неустойчивость. Условная симметричная неустойчивость хорошо прогнозируется с помощью расчета эквивалентно-потенциального вихря (EPV) или влажно-потенциального вихря (MPV). Согласно [49], следует ожидать развития условной симметричной неустойчивости или влажной наклонной конвекции при выполнении следующих условий:

1. при $EPV < 0$ или $MPV < 0.25$
2. при значении влажности, превышающей 80% в приземном слое.

На Рис. 14 представлена заштрихованная зона – область отрицательных значений эквивалентно-потенциального вихря на уровне 285К. Можно определить дополнительное

количество осадков, вызванное влажной наклонной конвекцией. Конвективную вертикальную скорость можно вычислить, зная доступную потенциальную энергию наклонной конвекции (SCAPE):

$$\omega_c = \sqrt{SCAPE}. \quad (26)$$

Для вычисления SCAPE воспользуемся методикой [46]. В этой работе предложено рассмотреть SCAPE как сумму двух слагаемых. Первое слагаемое – обычная энергия неустойчивости (CAPE), которая определяется по аэрологической диаграмме, как площадь, находящаяся между кривыми состояния и стратификации в соответствующих слоях (1). Второе слагаемое – связано с работой центробежных сил. В [46] предлагается вычислять температурную добавку:

$$\delta T(z) = \frac{T_v \cdot f}{2 \cdot g \cdot \Omega_a} \cdot \frac{d[(v-v_0)^2]}{dz}, \quad (27)$$

где T_v – средняя виртуальная температура в слое, f – параметр Кориолиса, v и v_0 – скорости ветра на верхней и нижней границе слоя, g – ускорение свободного падения, Ω_a – абсолютный вихрь, z – высота. Далее предлагается прибавлять эту добавку к температуре поднимающейся частицы $T(z)$ и вычислять энергию неустойчивости обычным способом, по формуле (1).

$$\tilde{T} = T(z) + \delta T(z). \quad (28)$$

Для рассматриваемого случая расчет для слоя 925 – 850 гПа:

$$\Delta T_{925-850} = 264.4 \cdot (12 - 2)^2 / (2 \cdot 9.8 \cdot 650) \approx 2^\circ \text{C}. \quad (29)$$

Энергия неустойчивости с учетом увеличения температуры на 2 градуса на уровне 850 гПа здесь составила 76 Дж кг⁻¹. Значение средней конвективной вертикальной скорости (ω_k) составило 8.71 м/с. Для расчета интенсивности ливневых осадков необходимо найти среднюю вертикальную скорость в кучево-дождевом облаке по следующей эмпирической формуле [25]:

$$\omega = 0.33 \cdot 10^{-4} (m \cdot \omega_k h), \quad (30)$$

где m – толщина конвективно-неустойчивого слоя (гПа), h – мощность конвекции (гПа).

Подставив в формулу значения $m = 85$, $h = 250$ и $\omega_k = 8.71$, получим: $\omega = 6.1 \text{ см/с} = -23.8 \text{ гПа/ч}$. Интенсивность ливневых осадков, согласно [25]:

$$I_{\lambda} = 1.5 \Delta q_{850} + 3.0 \Delta q_{700} = 1.3 \text{ мм/ч.} \quad (31)$$

Согласно [46], временной масштаб для ливневых осадков, вызванных наклонной конвекцией, имеет порядок $1/f$ и составляет 2 - 4 часа. Следовательно, количество конвективных осадков, вызванных наклонной конвекцией в районе Москвы, составило 4 - 5 мм. Подставив в формулу (32) значения обложных (Таб. 2) и конвективных осадков, получим общее количество осадков ($Q_{\text{общ}}$ - конвективных и обложных), которые за 12 час составили:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{обл}} + Q_{\text{кон}} = 5,1 + 4,5 = 9,6 \text{ мм.} \quad (32)$$

В Таблице 3 представлены рассчитанные значения общего количества осадков для станций Московского региона.

Выводы о причинах сильных осадков 7 декабря 2009 г. в Московском регионе:

- произошло вторжение стратосферного воздуха в верхние слои тропосферы, что привело к образованию положительной аномалии потенциального вихря над Московским регионом;
- возникло циклоническое вращение в нижней тропосфере, произошло развитие отрицательных вертикальных скоростей крупномасштабных движений, что вызвало появление осадков;
- резкое усиление осадков произошло из-за влажной наклонной конвекции, которая возникла благодаря наличию условной симметричной неустойчивости в нижней тропосфере, что было подтверждено образованием отрицательной аномалии эквивалентно-потенциального вихря в нижней тропосфере, а также тем, что в нижних слоях тропосферы влажность воздуха в среднем была более 80%.

Таблица 3. Фактическое количество полусуточных осадков по данным наблюдений на метеостанциях Московского региона и прогностическое, рассчитанное с учетом наклонной конвекции.

Индекс станции	Фактические осадки, мм	Рассчитанные осадки, мм
27507	12	9.6
27619	11	9.4
27511	11	9.7
27509	9	9.1
27612	8	9.6

Метод прогноза сильных конвективных осадков в холодное время года, основанный на определении условной симметричной неустойчивости, разработан в рамках диссертационной работы и изложен в Гл. 3.

2.4.2 Использование изэнтропического анализа при анализе причин чрезвычайных ситуаций в авиации

Происшествие с самолетом Аэробус А-320 в воздушном пространстве Грузии 11.01.2009 г.

Главным управлением Гражданской авиации при Правительстве Республики Армения было сообщено о происшествии, вызванном вихревым турбулентным следом. В сообщении указывалось, что самолет Аэробус А-320, зарегистрированный в Республике Армения, 11 января 2009 года попал в турбулентность в следе Аэробуса А-380 в воздушном пространстве Грузии. В результате существенного воздействия вихревого следа, имело место отключение автопилота, повышенный крен, и как следствие, необходимость стабилизации воздушного судна в ручном режиме со стороны экипажа. Событие произошло в условиях полного соблюдения установленных норм и процедур ИКАО по эшелонированию воздушных судов (ВС) А-320 и А-380 в условиях RVSM (концепция, предусматривающая сокращение интервалов вертикального эшелонирования в верхнем воздушном пространстве между эшелонами до 1000 футов, то есть 300 метров).

Погодные условия.

Синоптическая и аэросиноптическая ситуация в районе Ереван – Тбилиси на период 11 января 2009г. 06.00...08.00 ВСВ:

У земли погода определялась юго-восточной периферией антициклона с центром в Бухаресте. На высотах 500 гПа-250 гПа (5000...10000 м) ложбиной от циклона в районе Самары (Рис. 15).

По данным WAFC Лондон (один из мировых авиационных прогностических центров, подготавливающий и передающий необходимую метеорологическую информацию для полетной документации) расчеты турбулентности в ясном небе на 06.00 ВСВ 11 января 2009 показывали отсутствие зоны турбулентности по трассе BANUT-TUNIS. Прогнозируемый боковой ветер по трассе имел направление 320°- 330°и скорость 42-45 км/ч (Рис. 16). Прогнозируемая температура на эшелоне составляла -50° ...-55°С. На Рис. 17 представлены показания бортовых датчиков температуры и давления (пересчитанного в показания высоты эшелона в футах

по стандартной атмосфере), из которых видно, что температура за бортом воздушного судна в момент чрезвычайного происшествия составляла -29.5°C .

У комиссии, расследующей это летное происшествие, возникли вопросы, на которые

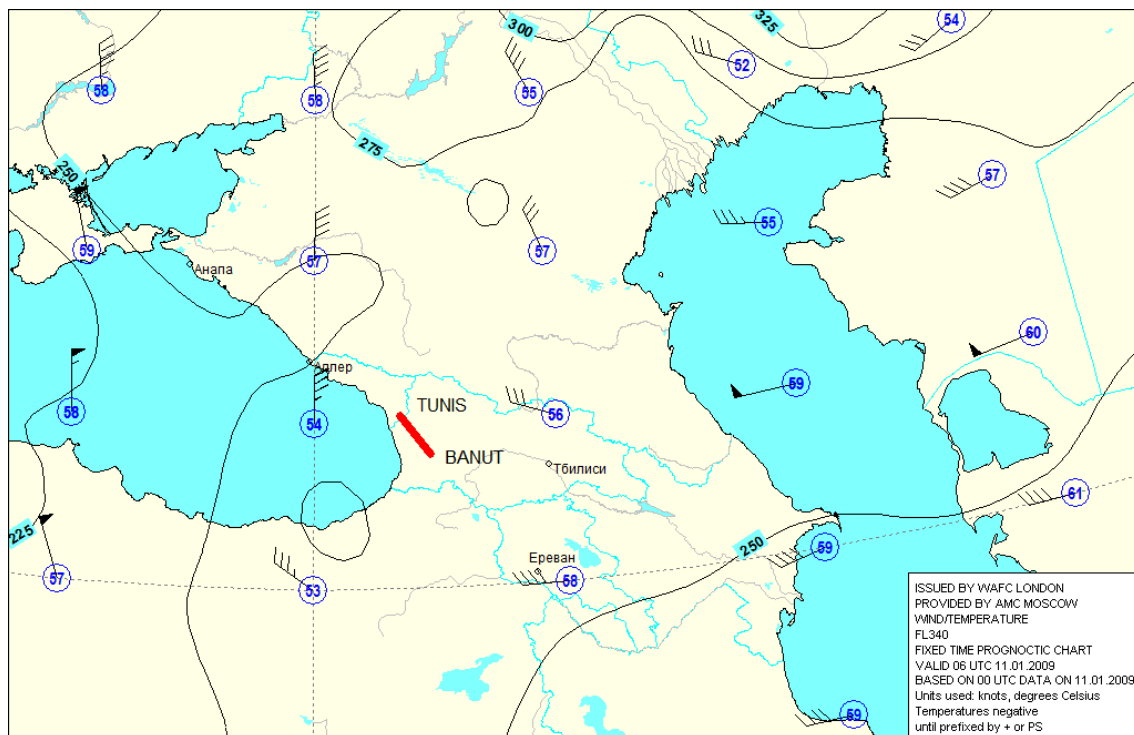


Рис.16. Карта AT250, ветер и давление на уровне тропопаузы 11/01/2009 06 ВСВ.

было непросто ответить, используя классические прогностические погодные карты: могли ли погодные условия на маршруте усилить воздействие турбулентного следа? Почему показания датчика температуры воздушного судна оказались на 15 - 20 градусов выше прогнозируемой на этом эшелоне температуры? Один из членов комиссии обратился к диссертанту с просьбой исследовать это летное происшествие.

Расчеты, проведенные диссертантом, показали, что на пути самолета оказалась ложбина тропопаузы. На Рис. 17 представлено значение давления на уровне потенциального вихря равном 2 PVU. Это значение соответствует уровню динамической тропопаузы [52]. Это было диагностировано при анализе этого летного происшествия нанесением на карту маршрута самолета значений давления на уровне $PV = 2 \text{ PVU}$.

Представленный в диссертации анализ показал, что воздушные суда оказались в зоне аномалии потенциального вихря (под аномалией понимается, в Северном полушарии, локальный максимум положительного значения вертикальной составляющей потенциального вихря), где присутствуют интенсивные нисходящие и восходящие вертикальные движения (Рис. 18).

Этим диссертант объясняет усиление воздействия турбулентного следа на воздушное судно Аэробус А-320, находящееся на соседнем по высоте эшелоне. Нахождение в зоне аномалии PV объясняет и увеличение температуры на 15 – 20 градусов по показанию бортового датчика, по сравнению с температурой, прогнозируемой WAFC Лондон.

TIME BCB	Температура, (C°)	Баровысота, футы
08:51:41	-29.5	32956
08:51:42	-29.5	32960
08:51:43	-29.5	32960
08:51:44	-29.5	32960
08:51:45	-29.5	32964
08:51:46	-29.5	32964
08:51:47	-29.5	32964
08:51:48	-29.5	32964
08:51:49	-29.5	32964
08:51:50	-29.5	32968

Рис. 17. Показания бортовых датчиков температуры и давления Аэробуса А-320.

Такое увеличение температуры могло само по себе стать причиной резкого уменьшения тяги двигателей, что также могло привести к повышенному крену и отключению автопилота.

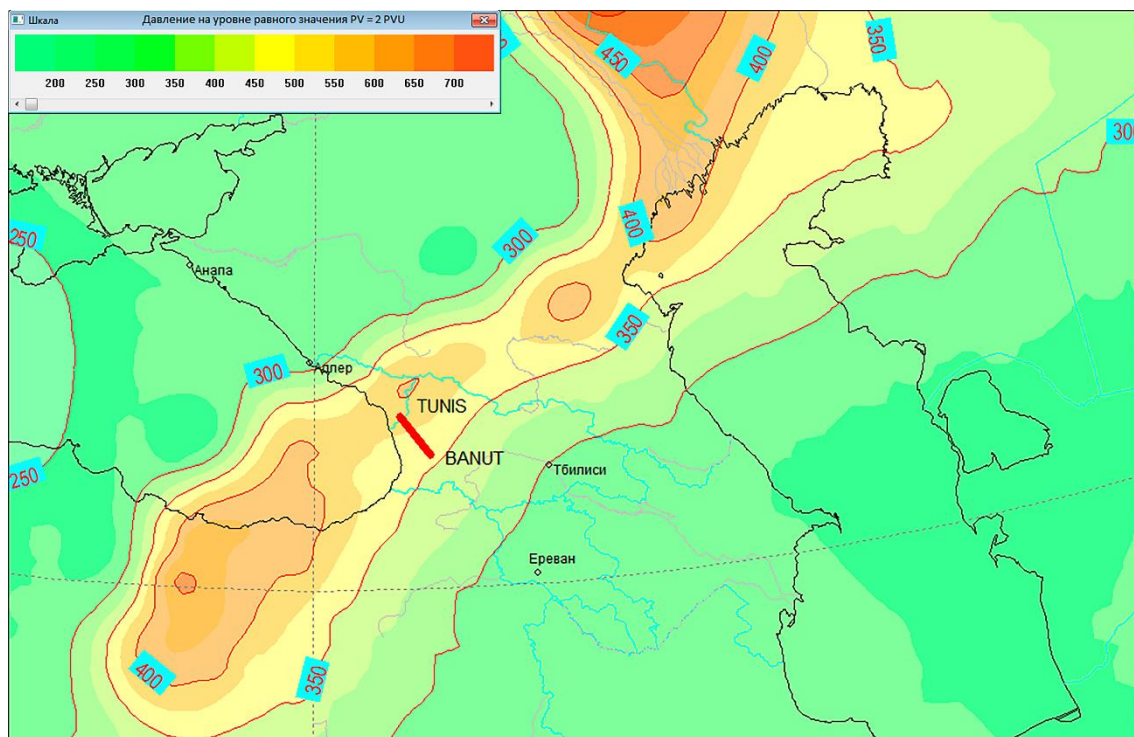


Рис.18. Значение давление на уровне потенциального вихря, равного 2 PVU, 11.01.2009 г. 06:00 ВСВ. Красный отрезок – участок маршрута, где произошло летное происшествие.

На Рис. 19 представлен примерный вертикальный разрез атмосферы со схемой полета по маршруту BANUT – TUNIS (см. Рис. 18).

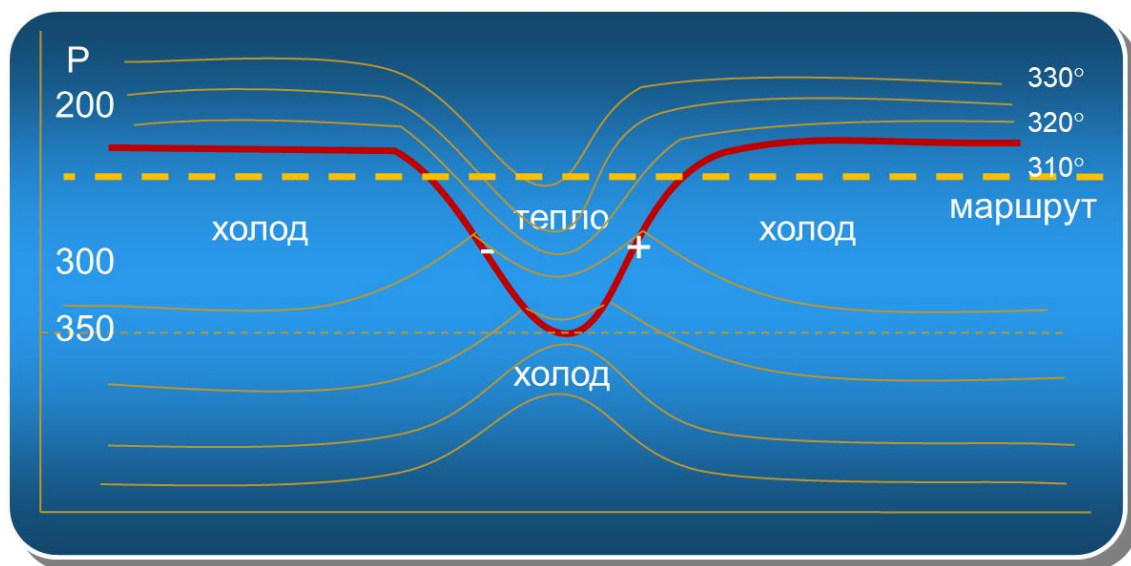


Рис. 19. Схема полета по маршруту, объясняющая разницу температуры бортовых датчиков, по сравнению с прогностическими данными WAFS Лондон. На рисунке изображены изолинии потенциальной температуры. Красная линия – тропопауза.

Летное происшествие 7.01.2017г. с пассажирским лайнером A380-800, выполняющим рейс из Дубая в Сидней

Приведем результаты исследования диссертантом [39] еще одного летного происшествия, которое произошло 7 января 2017 г. Пассажирский лайнер A380-800 авиакомпании Emirates выполнял рейс из Дубая в Сидней. В тот момент, когда самолет находился над Аравийским морем примерно в тысяче километров к юго-востоку от оманского города Маската, его маршрут пересек бизнес-джет Bombardier Challenger 604. Бизнес-джет пролетел немного позади гигантского лайнера и примерно на 300 м ниже него. Это вызвало попадание Bombardier Challenger 604 в спутный след самолета A380 и потерю управляемости. Самолет несколько раз перевернулся в воздухе, а нарушение режима полета вызвало остановку обоих турбореактивных двигателей, что привело к его мгновенному падению вниз. Бизнес-джет падал порядка трех километров, пока пилотам не удалось запустить двигатели и восстановить управление. Сразу после этого бизнес-джет вернулся в аэропорт Маската и совершил экстренную посадку. На его борту находились девять пассажиров и членов экипажа.

Полеты обоих воздушных судов проходили в полном соответствии с правилами ИКАО. Challenger 604 шел в отведенном ему эшелоне на 1000 футов ниже A380, но в противоположном направлении. Диспетчерские службы стараются выдержать не только пространственный, но и временной промежуток между воздушными судами, составляющий примерно 5 минут, необходимых для рассеивания или сноса ветром спутного следа. Однако, в данном случае имело место непредсказанное по стандартной методике снижение спутного следа без рассеивания. Полет проходил на высоте 10000 м, потенциальная температура 345 К. Тропопауза находилась на высоте 16 км. Схема полета воздушных судов и воздействие спутного следа представлены на Рис. 20. Анализ этой ситуации показал, что в данном случае, воздушные суда находились в тропосферном воздухе. Однако, построенные карты потенциального вихря в тропосфере, на высоте маршрута (около 10000 м), показали, что на пути воздушных судов была обнаружена аномалия потенциального вихря, с абсолютными значениями около 1 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K}^\circ \text{ м}^2 / \text{кг с}$). Для построения карт потенциального вихря при анализе авиапроисшествия диссертантом использовались данные глобальной модели UKMO (Великобритания), с разрешением $1.25^\circ \times 1.25^\circ$.

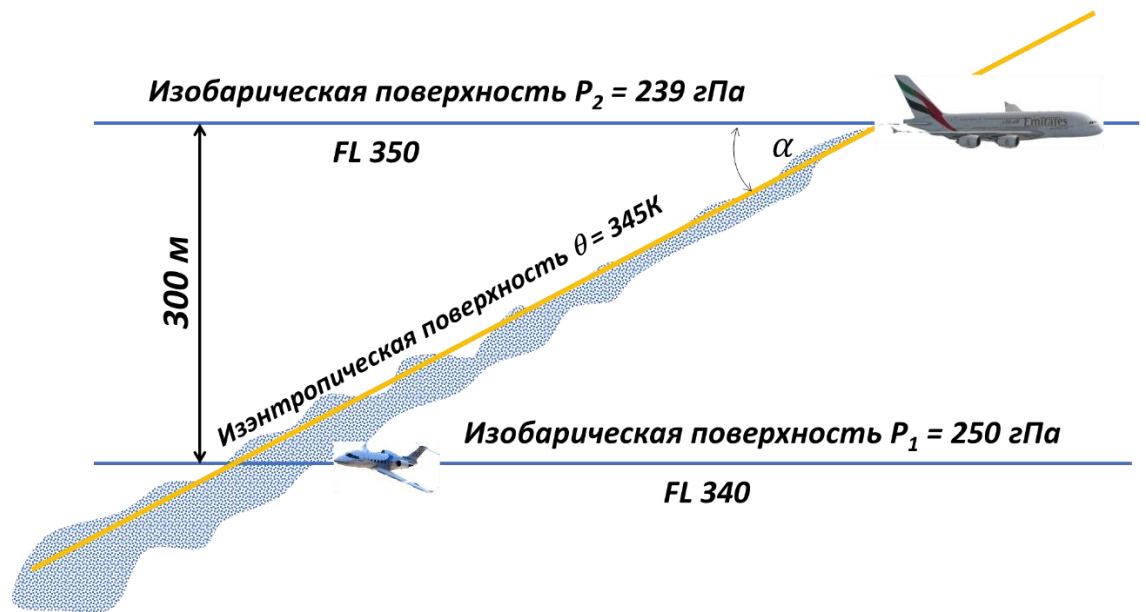


Рис. 20. Схема полета воздушных судов 7 января 2017 г. и воздействие спутного следа.

На основании приведенных примеров анализа авиационных происшествий мы полагаем, что во избежание подобных опасных случаев было бы полезно включить в полетную документацию карту динамической тропопаузы по маршруту полета. Созданные на основе изложенной технологии изэнтропического анализа программные средства, включенные в архитектуру АРМ Синоптика [1], позволяют оперативно готовить подобные карты для любого региона Земного шара. Предлагается также изготавливать для полетной документации карты, с нанесенными зонами, в которых угол α между пересекающимися поверхностями равного давления, по которой проложен маршрут самолета и изэнтропической превышает некоторую критическую величину, опасную с точки зрения воздействия турбулентного следа на самолет, находящийся на соседнем эшелоне (см. Рис. 20).

$$\alpha = \arccos \left[\frac{(\nabla P, \nabla \theta)}{|\nabla P| \cdot |\nabla \theta|} \right]. \quad (33)$$

Исходя из того, что минимально допустимое расстояние между эшелонами по вертикали равно 300 м, а длина спутного следа, который может оказать воздействие на воздушное судно, находящееся на соседнем эшелоне примерно равна 10000 м, можно определить пороговые значения угла, между поверхностями P и θ :

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{300}{10000} \right) \approx 2^\circ. \quad (34)$$

Согласно [30], угол между изэнтропической и изобарической поверхностями может служить мерой бароклинности атмосферы, поэтому такая информация может быть полезна не только авиационным синоптикам, но и обычным синоптикам, исследующим процессы в атмосфере.

Выводы

1. Представлена технология изэнтропического анализа, реализованная для работы в оперативном режиме, доступная синоптикам в рамках АРМ Синоптика. Разработанная технология позволяет представить на любой изэнтропической поверхности такие метеорологические параметры как высоту, давление, ветер, влажность, а также такие атмосферные характеристики, как изэнтропический потенциальный вихрь, влажно-потенциальный вихрь, влажно-потенциальный вихрь в состоянии насыщения, рассчитать меру статической устойчивости (расстояние между изэнтропическими поверхностями), разность между давлением на изэнтропической поверхности и уровнем конденсации.
2. На примере конкретных случаев использования изэнтропического анализа на практике, показана эффективность его применения в случае, когда результаты гидродинамических моделей не достигают ожидаемой точности прогнозирования, и применение только изобарического анализа оставляет нерешенными, некоторые вопросы об атмосферных процессах.
3. Проведенная статистическая обработка данных по определению зависимости влажности от расстояния, измеряемого по направлению вдоль ветра и в направлении, ортогональном направлению ветра, на изэнтропической поверхности 300К (900 – 700 гПа) и на изобарической поверхности 850 гПа (стр. 33, Рис.5) показала, что разница между значениями корреляционных функций для изэнтропической поверхности 300 К и изобарической поверхности 850 гПа составляет до 20%, что подтверждает предположение, что изэнтропический анализ больше подходит для прогноза осадков, чем изобарический анализ.
4. Представлены анализы чрезвычайных летных происшествий, случившихся в результате воздействия на воздушное судно, находящееся на маршруте, спутного следа. Сделано предположение о связи угла наклона между изобарической поверхностью, по которой проложен маршрут воздушного судна, и изэнтропической поверхностью, по которой проложена траектория распространения спутного следа, со степенью воздействия спутного следа. Предложен способ расчета угла наклона изэнтропической поверхности относительно изобарической поверхности. Предложено во избежание подобных случаев включать в полетную документацию карту динамической тропопаузы по маршруту полета.
5. Представленная технология изэнтропического анализа не заменяет традиционный (изобарический) способ исследования явлений погоды, но может существенно дополнить его, позволяя дополнительно по-другому посмотреть на процессы, происходящие в атмосфере и в итоге помочь синоптику в уточнении прогноза.

Глава 3

Метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодный период года

Прогнозирование сильных конвективных осадков в холодное время года, несмотря на успехи, достигнутые в области совершенствования гидродинамических моделей, остается достаточно сложной проблемой. Нами (это известно и из многочисленных статей других авторов), получено, что результаты прогнозов сильных осадков часто существенно отличаются от данных наблюдений [35]. Поэтому разработка методов прогноза сильных осадков до сих пор актуальна для оперативной метеорологии.

Известны работы по использованию крупномасштабных предикторов для прогноза сильных конвективных осадков. Способы прогноза ливневых осадков рассмотрены в работе [25]. Основным предиктором в этих методах прогноза осадков является конвективная вертикальная скорость, определяемая по энергии конвективной неустойчивости. Однако, как показано в [65], в холодный период года лишь 9% конвективных явлений связаны с конвективной неустойчивостью. В [33] в качестве предикторов предложено использовать такие характеристики, как фронтальный параметр, фронтогенетическая функция, потенциальный вихрь, высота уровня динамической тропопаузы, уровень нулевой плавучести. В этой работе делается вывод о том, что в холодный период года основными предикторами являются фронтальный параметр и фронтогенетическая функция.

Для прогноза осадков в холодный период диссертант в [35] в качестве предикторов предложил использовать потенциальный вихрь PV в средней тропосфере (на изобарической поверхности 500 гПа) и эквивалентно-потенциальный вихрь в нижней тропосфере (на изобарических поверхностях 925 - 850 гПа).

В [73, 74] для определения степени динамического вынуждения и направления вертикальной скорости рассматривается возможность использования дивергенции Q -вектора.

Согласно [52] Q -вектор определяется, как

$$\vec{Q} \equiv (Q_1, Q_2) = \left(-\frac{R}{p} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} \cdot \nabla T, -\frac{R}{p} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \cdot \nabla T \right), \quad (35)$$

где $R = 287 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$ - универсальная газовая постоянная, p - давление, \vec{V} - вектор геострофического ветра.

Диагноз значений Q -вектора, в качестве метода оценки квазигеострофического вынуждения, применяется с конца 1970-х годов [75]. В настоящее время в ряде зарубежных метеослужб для прогноза осадков используется оперативный анализ полей дивергенции Q -вектора [75]. В [74] для прогноза зимних конвективных осадков предлагается на разных уровнях в нижней тропосфере рассчитывать функцию PVQ , включающую в себя дивергенцию Q -вектора

и эквивалентно-потенциальный вихрь в состоянии насыщения, а затем полученные карты сопоставлять с картами влажности и температуры.

Метод прогноза осадков в холодный период года, описанный в [74], взят за основу метода и усовершенствован в настоящей работе.

3.1 Основа метода прогноза интенсивных осадков и алгоритм его реализации

При разработке метода нами учитываются все условия, которые в [52] считаются необходимыми для формирования конвективных осадков: наличие динамического вынуждения, в результате которого осуществляется подъем воздушных частиц до уровня свободной конвекции; условная неустойчивость атмосферы; наличие достаточной влажности в приземном слое (не менее 80%).

Для определения степени динамического вынуждения в работах [49, 73, 75] в качестве предиктора используется дивергенция Q -вектора. Вертикальная скорость ω в квазигеострофическом приближении [53] связана с Q -вектором следующим образом:

$$(\sigma \nabla^2 + f^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2}) \omega = -2 \nabla \cdot \vec{Q}, \quad (36)$$

где σ - параметр статической устойчивости; ∇^2 — оператор Лапласа, f - параметр Кориолиса; p - давление, ω - вертикальная скорость.

Таким образом, в квазигеострофическом приближении на f - плоскости вертикальная скорость обусловлена только дивергенцией Q -вектора, который также используется в динамике атмосферы для понимания таких процессов, как вертикальные движения и циклогенез [29]. Дивергенция Q -вектора свидетельствует о нисходящих движениях воздуха, конвергенция - о восходящих.

Зависимость степени динамического вынуждения от дивергенции Q -вектора (согласно данным работы [74]), представлена в Табл. 4:

Таблица 4

Вынуждение	Слабое	Среднее	Сильное
$\nabla \cdot \vec{Q}, 10^{-15} \text{ кг}^{-1} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$	-1...-5	-5...-15	< -15

Для определения неустойчивости атмосферы, следуя [49, 52, 74], при разработке алгоритма метода прогноза осадков, мы использовали расчет эквивалентно-потенциального вихря в состоянии насыщения. В теплый период года главным типом неустойчивости, при которой формируются конвективные осадки, является конвективная неустойчивость. Как показывают

наблюдения, в холодный период года этот тип неустойчивости встречается значительно реже [62]. Основным типом неустойчивости в холодный период является условная симметричная неустойчивость [65].

При симметричной неустойчивости частица, которая устойчива в отношении сил, действующих в вертикальном и горизонтальном направлениях, может быть неустойчива к наклонному смещению [74]. Термин "условная" означает, что воздушная частица рассматривается в состоянии насыщения [74]. Согласно данным работы [65], летом с конвективной неустойчивостью связано 97% конвективных явлений, тогда как с условно-симметричной - только 1%. Напротив, зимой эти показатели составляют 9 и 68% соответственно. В работах [49, 62, 74] для определения условной симметричной неустойчивости предлагается использовать эквивалентно-потенциальный вихрь в состоянии насыщения.

Согласно [52], критерием присутствия симметричной неустойчивости является отрицательное значение потенциального вихря Эртеля.

В [49, 73, 75] утверждается, что условная симметричная неустойчивость появляется при отрицательных значениях эквивалентно-потенциального вихря в состоянии насыщения. В [74], исходя из предположения о независимости предикторов PV_{es} и \vec{Q} , была предложена для прогноза конвективных осадков в холодное время года функция $PVQ = f_{PV} f_Q$; где f_{PV} , f_Q - функции, учитывающие вклад эквивалентно-потенциального вихря и дивергенции Q вектора. В настоящей работе вводится дополнительный предиктор R - относительная влажность воздуха. Следуя [74], предлагается считать все 3 предиктора независимыми и рассчитывать функцию $PVQR_i = f_{PV} f_Q f_R$ на изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа, - где i - индекс, соответствующий конкретной изобарической поверхности; f_R - функция, учитывающая вклад в прогноз конвективных осадков относительной влажности R . Для потенциального вихря - это функция Хевисайда от PV_{es} , т.е. $f_{PV} = \frac{(|PV_{es}| - PV_{es})}{2}$, большие значения которой, как было указано ранее, соответствуют наибольшей вероятности условно-симметричной неустойчивости. Для Q -вектора рассматривалась его дивергенция, точнее области ее отрицательных значений, поэтому была выбрана функция Хевисайда для дивергенции Q :

$$f_Q = \frac{\left| \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right| - \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right)}{2}. \quad (37)$$

Для относительной влажности рассматривалась вероятностная модель. Ее математическое ожидание R равно значению, получаемому из расчетов гидродинамической модели UKMO с заблаговременностью 6, 12, 18 ч, на уровнях 925, 850 и 700 гПа, а дисперсия σ^2 рассчитывается как оценка максимального правдоподобия. Вероятность выпадения осадков

полагалась равной вероятности для относительной влажности принять значение 100%. Таким образом, для относительной влажности получаем функцию

$$f_R = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{100-R}{\sigma\sqrt{2}}\right), \quad (38)$$

где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$ – функция ошибок, а R в процентах. При использовании модели UKMO мы получили оценку $\sigma = 12,7$.

Чтобы оценить эффективность прогноза сильных осадков в холодный период года с помощью каждого предиктора по отдельности, для каждой из указанных выше функций определялись коэффициенты линейной регрессии и вычисляли суммарную функцию $PVQR$:

$$PVQR = a_{925} PVQR_{925} + a_{850} PVQR_{850} + a_{700} PVQR_{700}, \quad (39)$$

где a_{925} , a_{850} , a_{700} – коэффициенты линейной регрессии, $PVQR_{925}$, $PVQR_{850}$, $PVQR_{700}$ – значения функции на соответствующих изобарических поверхностях.

3.2 Исследование эффективности выбранных предикторов и оценка результатов прогноза

Как указывалось в предыдущем разделе, комплексная функция $PVQR$ включает несколько предикторов: эквивалентно-потенциальный вихрь в состоянии насыщения PV_{es} , Q -вектор и относительную влажность R . В данном разделе представлены оценки эффективности диагноза сильных осадков в холодный период года с использованием каждого из предикторов по отдельности и с использованием комплексной функции $PVQR$. Проводится сравнение результатов расчета количества осадков на основе предлагаемой функции $PVQR$ с результатами расчета по модели UKMO (Великобритания).

Для расчета диагностических характеристик (предикторов) и определения их связи с количеством осадков в работе использованы данные о полусуточных (дневных и ночных) суммах осадков на 12 метеостанциях Центрального региона России за период с декабря 2005 г. по февраль 2012 г.; прогностические поля метеовеличин (давление, геопотенциал, температура, ветер, влажность) с заблаговременностью 6, 12, 18 ч по модели UKMO на сетке $1,25 \times 1,25^\circ$ (с декабря 2005 г. по февраль 2008 г.); поля объективного анализа метеовеличин (давление, геопотенциал, температура, ветер, влажность) по модели UKMO на сетке $1,25 \times 1,25^\circ$ (с декабря 2009 г. по февраль 2012 г.), получаемых в коде GRIB.

Обработку результатов проводили в соответствии с методическими указаниями [27]. Данные об осадках на метеостанциях использовали без осреднения и интерполяции. Рассматриваемые в работе предикторы вычисляли непосредственно для каждой конкретной

метеостанции (применялась билинейная интерполяция на станции из точек сетки модели UKMO). В результате проведенных статистических оценок подтвердилось, что интенсивность осадков положительно коррелирует с каждым из предикторов. Для каждого анализируемого предиктора было найдено пороговое значение, соответствующее сильным осадкам (> 6 мм). Эффективность каждого предиктора оценивали с помощью критерия эффективности штормовых предупреждений S [27] и критерия Пирси - Обухова PI . Пороговые значения s и p предикторов подбирались таким образом, чтобы получить максимальные значения S и PI соответственно. Прогнозировались сильные осадки если превышено пороговое значение. Полученные на диагностическом материале коэффициенты линейной регрессии для предикторов PV_{es} , Q , R и $PVQR$, а также их пороговые значения s и p приведены в Табл. 5.

Таблица 5

Регрессионные коэффициенты a_i для осреднения по вертикали по формуле (39) и пороговые значения для s и p

Предиктор	a_{925}	a_{850}	a_{700}	s	p
PV_{es} ($m^2 \cdot c^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$)	0,087	0,161	0,752	$0,894 \cdot 10^{-6}$	$0,817 \cdot 10^{-6}$
\vec{Q} ($kg^{-1}m^2c^{-1}$)	0,178	0,457	0,365	$4,93 \cdot 10^{-9}$	$1,62 \cdot 10^{-9}$
R	0,076	0,163	0,761	0,342	0,198
$PVQR$	0,083	0,274	0,643	$6,98 \cdot 10^{-16}$	$3,76 \cdot 10^{-16}$

Ввиду того, что для опасных явлений главным критерием является эффективность штормовых предупреждений S , регрессионные коэффициенты для формулы (39) выбирались путем оптимизации по оптимуму S .

Порог p и соответствующие ему значения критерия Пирси - Обухова PI_{max} в Табл. 6 - 8 приведены только для сравнения с другими работами (например, [31, 33]), основанными на оценке с помощью критерия Пирси - Обухова.

Таблица 6

Оценка эффективности прогноза сильных осадков в холодный период года с помощью предикторов PV_{es} , \vec{Q} и R по расчетам по информации модели UKMO и сравнение с данным наблюдений.

Прогноз осадков, предиктор		Наблюдения			Критерий выбора ко- эффициентов		
		≥ 6 мм	< 6 мм	всего	S	PI	PI_{max}
PV_{es}	≥ 6 мм	101	649	750	0,111	0,293	0,325
	< 6 мм	160	6805	6965			
	всего	261	7454	7715			
\vec{Q}	≥ 6 мм	80	272	352	0,150	0,269	0,436
	< 6 мм	181	7182	7363			
	всего	261	7454	7715			
R	≥ 6 мм	152	383	535	0,226	0,529	0,576
	< 6 мм	109	7071	7180			
	всего	261	7454	7715			

В Табл. 6 представлены оценки эффективности прогноза сильных осадков с помощью предикторов PV_{es} , Q и R , в Табл. 5 - с помощью комплексной функции $PVQR$.

Таблица 7

Матрица сопряженности и оценка эффективности прогноза сильных осадков в холодный период года с помощью комплексной функции $PVQR$ по расчетам по выходной информации модели UKMO и сравнение с данными наблюдений

Прогноз осадков, предиктор		Наблюдения			Критерий		
		≥ 6 мм	< 6 мм	Всего	S	PI	PI_{max}
$PVQR$	≥ 6 мм	149	258	407	0,287	0,536	0,661
	< 6 мм	112	7196	7308			
	всего	261	7454	7715			
$PVQR_{\Sigma}$	≥ 6 мм	214	151	365	0,48	0,72	0,811
	< 6 мм	74	7276	7350			
	всего	288	7427	7715			
$PVQR_{12}$	≥ 6 мм	83	135	218	0,284	0,507	0,747
	< 6 мм	74	6140	6214			
	всего	157	6275	6432			

Примечание. $PVQR$ – расчет по диагнозу; $PVQR_{\Sigma}$ – расчет по прогнозам с заблаговременностью 6, 12 и 18 ч; $PVQR_{12}$ – расчет по прогнозу с заблаговременностью 12 ч.

Для оценки эффективности $PVQR$ использовали поля объективного анализа по модели UKMO за 4 года, соответствующие середине полусуточного интервала для данных наблюдений за осадками. В Табл. 7 приведены оценки $PVQR$ и по прогностическим данным. Поскольку модель UKMO выдает прогнозы с интервалом 6 ч, а данные наблюдений за осадками полусуточные, то отбирались данные в начале, середине и в конце соответствующего полусуточного

срока для фактических осадков, т. е. прогностические данные за 0 и 12 ч с заблаговременностью 6, 12, 18 ч. Вычислялась «комплексная» функция $PVQR_{\Sigma} = \frac{(PVQR_6 + PVQR_{12} + PVQR_{18})}{3}$ и затем сравнивалась с пороговым значением. В Табл. 7 приведены результаты расчетов также для функции $PVQR_{12}$, соответствующей прогнозу с заблаговременностью 12 ч на середину полусуточного срока.

Для оценки эффективности прогноза сильных осадков с помощью комплексной функции $PVQR$ был проведен анализ расчетов количества осадков по модели UKMO (Табл. 8). Сравнение результатов статистической обработки показало, что использование комплексной функции $PVQR$ (Табл. 7) позволило существенно улучшить, по сравнению с прогнозами осадков по модели UKMO, как качество прогноза по критерию Пирси - Обухова (0,72 против 0,334), так и показатель оправдываемости штормовых предупреждений (0,48 против 0,299).

Таблица 8

Матрица сопряженности и оценка эффективности прогноза сильных осадков по расчетам модели UKMO с заблаговременностью 12 и 18 ч

Прогноз осадков	Наблюдения		Всего
	≥ 6 мм	< 6 мм	
≥ 6 мм	53	20	73
< 6 мм	104	6255	6359
Всего	157	6275	6432

Примечание. Оправдываемость штормовых предупреждений $S = 0.299$, критерий качества прогноза Пирси - Обухова $PI = 0.334$.

3.3 Примеры прогноза случаев сильного снегопада в центральном регионе России

7 декабря 2009 г. в Москве и области на фоне высокого давления синоптики прогнозировали погоду без существенных осадков. Результаты расчета зарубежных гидродинамических моделей при прогнозе с заблаговременностью 24 ч. свидетельствовали о небольших осадках, которые в пересчете на сутки составили: по гидродинамической модели NCEP около 1 мм, по гидродинамической модели UKMO – 2,6 мм. Фактически за сутки 7 декабря в Москве выпало 11 мм осадков. Сильный снегопад начался около 10 ч московского времени и продолжался до полуночи. Этот случай подробно анализируется автором в работе [35] и рассматривался здесь в Гл. 2. Делается вывод, что конвективные осадки были вызваны наклонной

конвекцией, возникшей в результате присутствия условно-симметричной неустойчивости в приземном слое атмосферы. В [35] наличие динамического вынуждения диагностировалось с помощью изэнтропического анализа, показывающего подъем влажного воздуха по наклонной изэнтропической поверхности. На Рис.21 представлены данные о фактических осадках (показаны только осадки, превышающие 5 мм), выпавших 7-8 декабря 2009 г., изолинии дивергенции Q -вектора на изобарической поверхности 850 гПа, изолинии нулевых значений эквивалентно-потенциального вихря в состоянии насыщения на изобарической поверхности 850 гПа, значения относительной влажности на этой поверхности. Как было изложено выше, наличие вынуждения, способствующего подъему воздушных частиц, отмечается в зонах с отрицательными значениями дивергенции Q -вектора. Причем чем меньше значение дивергенции Q -вектора, тем сильнее вынуждение (Табл. 4).

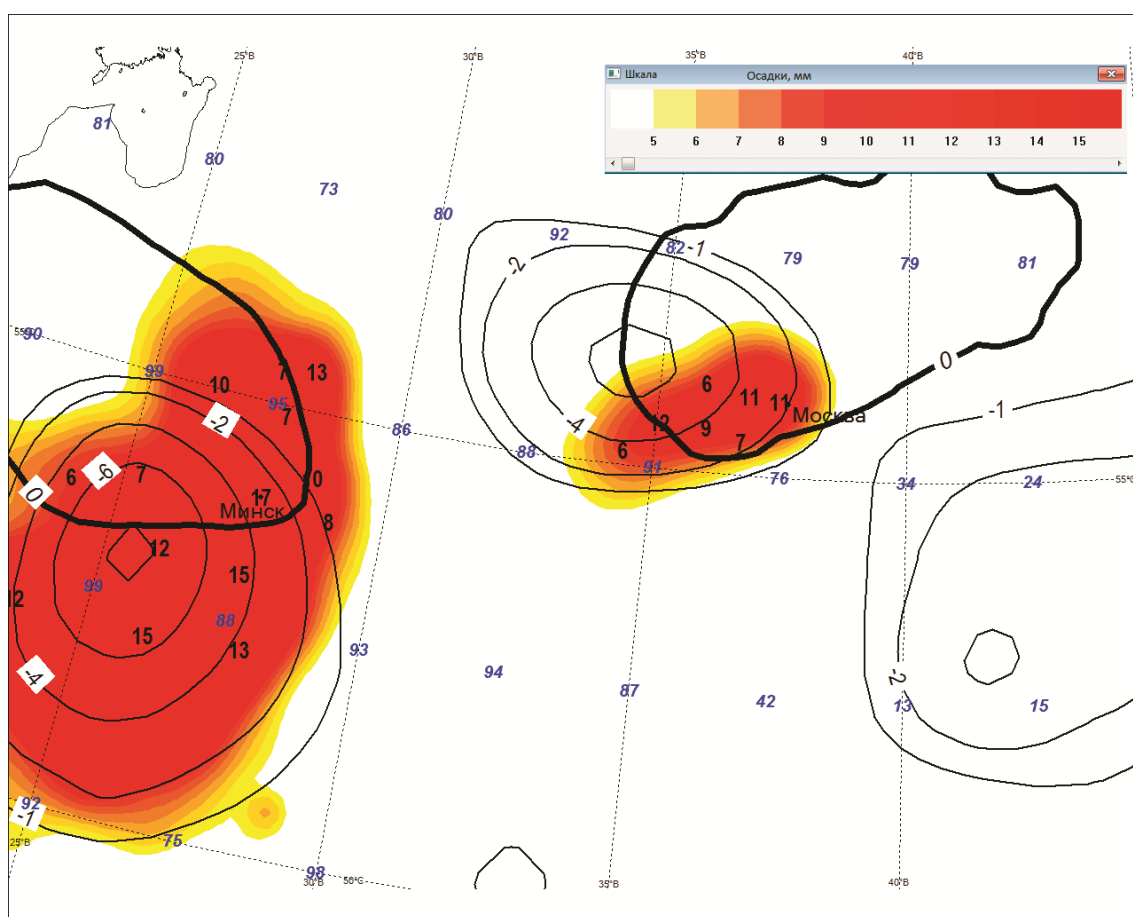


Рис. 21. Количество суточных осадков (мм) по данным наблюдений (черные цифры) в 3 ч ВСВ 8 декабря 2009 г.: показаны фактические осадки, превышающие 5 мм; тонкие линии - дивергенция Q -вектора на изобарической поверхности 850 гПа, жирные линии - эквивалентно-потенциальный вихрь при состоянии насыщения; синие цифры - значения относительной влажности; зона сильных осадков по разработанному методу (закрашенные области).

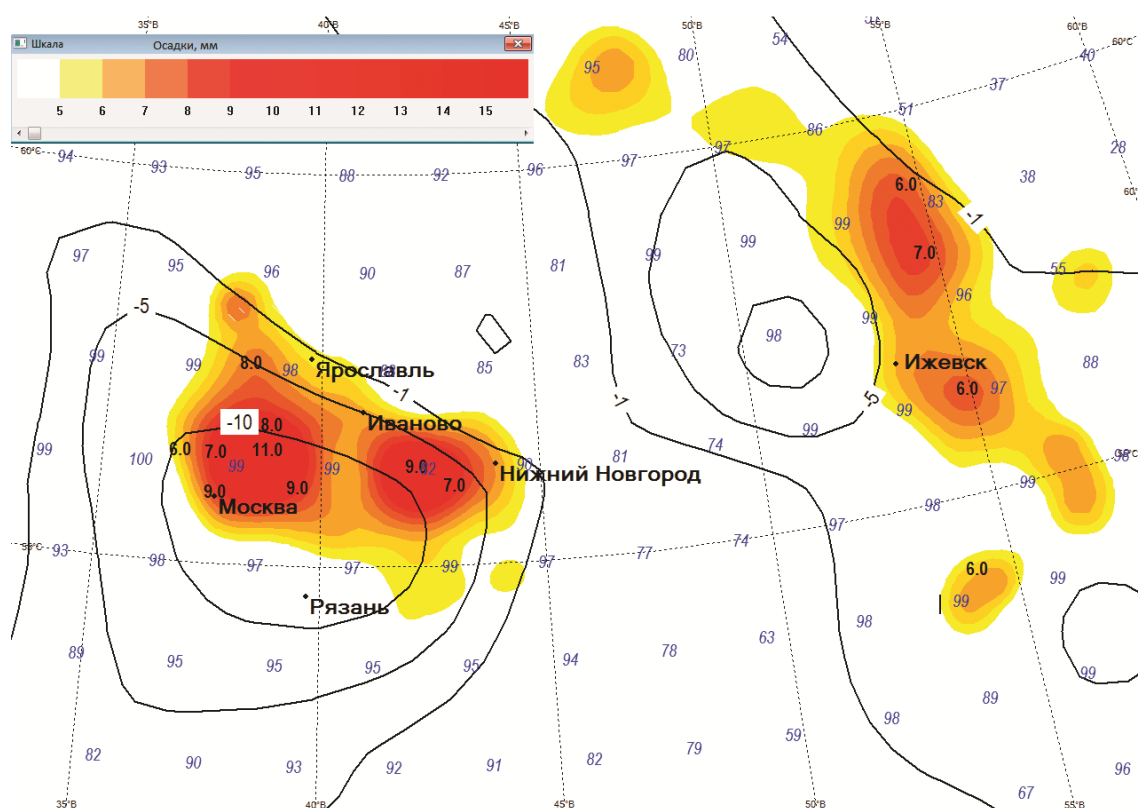


Рис. 22. Количество суточных осадков (мм) по данным наблюдений (черные цифры) в 3 ч ВСВ 21 марта 2012 г.: показаны фактические осадки, превышающие 5 мм; тонкие линии - дивергенция Q -вектора на изобарической поверхности 850 гПа; синие цифры - значения относительной влажности; зона сильных осадков по разработанному методу (закрашенные области).

На Рис.21 видно, что реальные области выпадения осадков гораздо меньше, чем области с отрицательными значениями дивергенции Q -вектора. Области с положительными значениями интегрального параметра $PVQR$ показаны закрашенными зонами. В этих зонах в соответствии с прогностическим алгоритмом присутствуют отрицательные значения дивергенции Q -вектора, отрицательные значения эквивалентно-потенциального вихря в состоянии насыщения, а также выполняется условие наличия достаточной влажности, причем все параметры рассчитываются на изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа.

На Рис.22 приведены фактические полусуточные суммы осадки по данным наблюдений в 3 ч ВСВ 21 марта 2012 г. В Московском регионе 20 - 21 марта выпала треть месячной нормы осадков. На Рис. 21 - 22 показаны изолинии дивергенции Q -вектора и значения относительной влажности на изобарической поверхности 850 гПа. Итоговые прогнозируемые зоны сильных осадков показаны в виде закрашенных областей.

Выводы

1. Разработан метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодное время года с использованием таких крупномасштабных предикторов, как дивергенция Q -вектора, эквивалентно-потенциальный вихрь в состоянии насыщения и относительная влажность воздуха в нижней тропосфере.
2. Метод реализован на выходной продукции модели УКМО и протестирован на данных за 2005 - 2012 гг.
3. Сравнение результатов оценки разработанного метода, по выходным данным гидродинамической модели УКМО и прогнозов гидродинамической модели УКМО, показало значительное улучшение по сравнению с прогнозами осадков модели УКМО, как по критерию качества прогноза Пирси - Обухова (0,72 против 0,33), так и по показателю оправдываемости штормовых предупреждений (0,48 против 0,29).
4. Разработанный метод имеет ряд преимуществ, по сравнению с прототипом [74]:
 - учитываются практически все необходимые для формирования сильных конвективных осадков условия;
 - введение в прогностическую формулу, кроме дивергенции Q -вектора и эквивалентно-потенциального вихря в состоянии насыщения, относительной влажности на изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа, а также учет прогнозов нескольких заблаговременностей, позволяют сразу получать итоговую зону сильных конвективных осадков. В результате отпадает необходимость в сопоставлении результатов, полученных по данным на разных уровнях, а также с картами относительной влажности.

Глава 4

Метод прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля

Прогноз шквалов является одной из главных задач в метеорологии, поскольку они относятся к явлениям погоды, представляющим угрозу безопасности людей и способным нанести значительный ущерб отраслям экономики. Шквалы относятся к мезомасштабным явлениям, связанным с зонами активной конвекции.

В Руководствах по краткосрочным прогнозам [25, 26] описаны рекомендованные к применению на территории России методы прогноза шквалов Пескова - Снитковского, Решетова, Фобуша – Миллера. Успешность прогноза с помощью указанных методов в большой степени зависит от правильной оценки синоптического положения, а это в свою очередь, является довольно трудоемкой и субъективной задачей, что представляет основную сложность для создания надежного алгоритма по оперативному прогнозу шквалов. Формальной оценки успешности по этим методам не имеется. Эти методы были автоматизированы диссертантом и включены в архитектуру АРМ Синоптика. По нашим наблюдениям эти методы имеют большое количество ложных тревог, что затрудняет применение этих методов в компьютерных прогнозах опасных явлений.

Методы прогноза шквалов [4, 5, 11, 17] автоматизированы. Основными предикторами для шквалов в градации ОЯ является максимальная конвективная скорость и лапласиан приземного давления.

Метод Алексеевой [4, 5] был рекомендован в 2015 г. Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета к внедрению в оперативную практику. Результаты испытаний показали, что метод альтернативного (бинарного: да или нет) прогноза шквалов в градации ОЯ имеет практическую значимость, поскольку величины критерия качества Пирси - Обухова близки или превышают величину 0,3 и находятся в интервале до 0,7. При этом оправдываемость прогнозов с явлением при заблаговременности 12 ч весьма низкая (в пределах 19%), а предупрежденность случаев с явлениями при заблаговременности 12 ч составляет 53- 83%, при заблаговременности 24 ч – от 39 до 67%. Вместе с тем прогнозы, не предсказывающие ОЯ, имеют высокую оправдываемость (98 - 99%) и общую оправдываемость от 79 до 83%.

Этот метод прогноза шквалов в градации ОЯ рекомендован ЦМКП для внедрения в оперативную автоматизированную технологию с заблаговременностью 12 и 24 ч по исходным срокам 00 и 12 ВСВ с использованием выходной продукции региональной гидродинамической модели атмосферы в Гидрометцентре России. Северо-Кавказскому УГМС и УГМС ЦЧО

рекомендовано использовать в оперативной практике методические прогнозы шквалов в качестве консультативного материала.

В работах [44, 49, 56, 66] для диагноза и прогноза зон активной конвекции предлагается воспользоваться расчетом потенциального вихря в тропосфере. Согласно [57], наличие положительной аномалии потенциального вихря (PV) в верхних и средних слоях тропосферы приводит к уменьшению конвективной устойчивости в нижних слоях. Здесь и далее под аномалией потенциального вихря подразумевается, согласно [57], положительная в Северном полушарии область локального максимума изэнтропического потенциального вихря. В работе [67] говорится, что аномалия PV в верхней и средней тропосфере связана с развитием конвективного процесса благодаря тому, что способствует подъему воздушных частиц с нижних уровней. Согласно [40, 50], изменения в значении PV происходят в основном в результате нагрева воздуха, вызванного выделением скрытой теплоты конденсации, поэтому образование аномалии PV в средней тропосфере чаще всего связано с развитием глубокой влажной конвекции. Полную производную потенциального вихря по времени можно записать так [40]:

$$\frac{d(PV)}{dt} \approx -g(f + \zeta_\theta) \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{dQ}{dt} \right), \quad (40)$$

где g – ускорение силы тяжести, f – параметр Кориолиса, ζ_θ – относительный вихрь скорости на изэнтропической поверхности, Q – теплота (не путать с Q вектором). Приток тепла в средней тропосфере, вызванный выделением скрытой теплоты конденсации при образовании осадков, увеличивает потенциальный вихрь в нижней тропосфере и ослабляет – в верхней (Рис. 23).

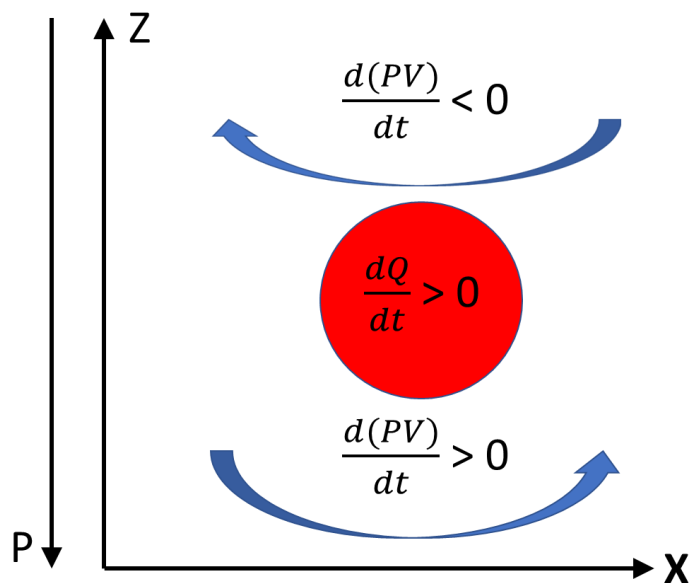


Рис.23. Выделение в средней тропосфере скрытой теплоты конденсации усиливает потенциальный вихрь в нижней тропосфере и уменьшает в верхней (по 37).

Согласно [67], образование аномалии потенциального вихря в средней и верхней тропосфере приводит к изменению стратификации температуры таким образом, что уменьшается статическая устойчивость атмосферы, уменьшается энергия противодействия конвекции (*CIN*) и увеличивается доступная потенциальная энергия конвекции (*CAPE*). В работах [45, 50] расчет потенциального вихря использован для диагноза формирования и развития линии шквалов.

Вывод: задача точного прогноза шквалов до сих пор не решена, большое количество различных методов прогноза шквалов, внедренные в практику, рекомендованы для использования лишь в качестве консультативных для дежурного синоптика.

4.1 Разработка метода прогноза шквалов

По современным представлениям шквалы происходят в результате глубокой влажной конвекции [57]. Необходимы три условия, при которых происходит влажная конвекция [53]:

1. Достаточная влажность в приземном слое (не менее 60 %).
2. Условная (влажная) неустойчивость в атмосфере.
3. Динамическое вынуждение, в результате которого происходит подъем воздушных частиц до уровня свободной конвекции.

Известно, что большинство шквалов (более 80%, в том числе самые сильные) происходят на холодных фронтах [25, 26]. Одним из условий существования активных фронтальных зон является достаточное количество влаги в приземном слое [29, 55]. Согласно [29], в окрестностях фронтов, систематически формируются конвективно-неустойчивые или слабоустойчивые слои. Таким образом, в активной фронтальной зоне выполняются 1 и 2 условия из необходимых для развития глубокой влажной конвекции.

В работе [54] взрывное понижение давления на поверхности земли (на 24 гПа или более за 24 часа) объясняется мощными восходящими движениями, которые возникают при взаимодействии положительной (в Северном полушарии) аномалии потенциального вихря с бароклинными зонами в нижней тропосфере. Согласно [54], в результате этого взаимодействия возникает система с положительной обратной связью, состоящая из аномалии потенциального вихря в верхних слоях тропосферы и положительной температурной аномалией в приземной бароклинной зоне. Таким образом, присутствие положительной аномалии вертикальной компоненты *PV* в тропосфере, с одной стороны является признаком существования зон активной конвекции [50, 67], с другой стороны, согласно [54], взаимодействие аномалии *PV* с приземными бароклинными зонами, создает условия для динамического вынуждения, способствующего образованию и усилению конвекции. Следовательно, определив аномалии

потенциального вихря и приземные бароклинные зоны, при условии их пересечения, можно предположить с большой долей вероятности существование или формирование в этой области зоны активной конвекции.

Согласно [21], скорость ветра при шквале зависит от кинетической энергии нисходящего потока и от горизонтального ветра в нижних и средних слоях тропосферы. Поэтому далее, в найденной области активной конвекции необходимо исследовать распределение горизонтального ветра на высотах, поскольку, согласно [21], шквалы образуются в результате опускания воздуха и переноса количества движения сверху вниз.

Таким образом, наш алгоритм прогноза шквалов предполагает использование выходной информации различных гидродинамических моделей и включает в себя решение следующих задач:

1. Расчет вертикальной компоненты потенциального вихря Эртеля в тропосфере.
2. Нахождение фронтальных зон в нижней тропосфере и определение холодных фронтов.
3. Определение зон пересечения аномалий потенциального вихря с бароклинными и фронтальными зонами.
4. Расчет максимальных порывов ветра в этих зонах.

Вертикальное слагаемое потенциального вихря Эртеля математически представляет собой произведение абсолютного вихря на изэнтропической поверхности на выражение, определяющее устойчивость атмосферы [52], формула (17).

Формула для вертикальной составляющей потенциального вихря на изобарической поверхности выглядит так [45]:

$$PV_p = -g \left[\left(f + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)_p \right) \frac{\partial \theta}{\partial p} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_p \frac{\partial v}{\partial p} - \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)_p \frac{\partial u}{\partial p} \right]. \quad (41)$$

В работе [47] предлагалось рассчитывать значение потенциального вихря, приведенное к изобарической поверхности 500 гПа, в качестве одного из предикторов для определения вторжения стратосферного воздуха в тропосферу.

Положение бароклинных зон рассчитывалось по модифицированной диссертантом методике [55, 64].

Значение функции, определяющей положение фронтальных линий, по методике [64] предлагается определять так:

$$\psi = \nabla |\nabla \xi| \cdot \vec{n}_\xi, \quad (42)$$

где ξ - фронтальный параметр, $\vec{n}_\xi = -\frac{\nabla \xi}{|\nabla \xi|}$ - единичный вектор.

В качестве фронтального параметра в [64] использовалась потенциальная температура, а в [55] было предложено использовать эквивалентную “толщину”, определяемую следующим образом:

$$ZTE = - \sum_{850}^{500} \frac{R}{g} \bar{T}_e \ln(p_u/p_l) \quad (43)$$

– эквивалентная “толщина” слоя от 850 до 500 гПа, $\bar{T}_e = (T_{e,u} - T_{e,l}) / \ln(T_{e,u}/T_{e,l})$ – средняя эквивалентная температура в слое. Эквивалентной называется температура, которую бы принял воздух, если бы весь содержащийся водяной пар сконденсировался, а выделившаяся теплота пошла на нагревание воздуха.

$$T_e = T \exp(L q_m / C_p T), \quad (44)$$

где $L = 2.26 \cdot 10^3$ кДж/кг – удельная скрытая теплота конденсации, q_m – отношение смеси, $C_p = 1.86$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость при постоянном давлении. Оригинальная формула [55] была модифицирована диссертантом добавлением данных на уровне 1000 гПа.

Будем называть активными фронтами те, которые сопровождаются мощными восходящими движениями и, следовательно, развитыми облачными системами и зонами осадков [55]. Поэтому, для устранения из последующего анализа тех участков гребней ψ , которые не соответствуют активным фронтальным зонам, в [55] используется индекс влажности:

$$HIX = (ZTE - ZT) / (ZTES - ZT), \quad (45)$$

где ZT – толщина в метрах слоя 1000–500 гПа, $ZTES$ – значение эквивалентной “толщины” в состоянии насыщения, рассчитывается по (43), но вместо q_m используется отношение смеси в состоянии насыщения. Согласно [55], области с $HIX > 0.7$ очень близки к облачным фронтальным системам, наблюдаемым на спутниковых изображениях.

В алгоритме, предложенном в [55], значения двух неравенств $HIX > 0.7$ и $\psi > 2.5$ считаются необходимым условием для существования активных фронтальных зон. Значения ψ тем больше, чем больше бароклинность в слое 1000–500 гПа, и функция ψ содержит информацию не только о положении, но и об интенсивности фронта [32].

Как уже отмечалось выше, наиболее опасные шквалы возникают на холодных фронтах [21], кроме того, только на холодном фронте, согласно [54], образуется положительная температурная аномалия в нижней тропосфере, возникающая вследствие циклонической циркуляции в бароклинной зоне. Поэтому, диссертантом был применен алгоритм определения холодных и теплых участков фронта (по значению адвективного изменения ZTE) [51]:

$$A_g = -\mathbf{V} \cdot \nabla[ZTE], \quad (46)$$

где \mathbf{V} – ветер. Здесь используются горизонтальные компоненты ветра и градиента в p -системе координат.

В [51] утверждается, что при $A_g < 0$ – фронт холодный, при $A_g \geq 0$ – теплый. Действительно, A_g – взятое со знаком минус скалярное произведение двух векторов, которое принимает отрицательное значение, когда угол между векторами менее 90° . Вектор градиента фронтального параметра $[ZTE]$ направлен в сторону увеличения этого параметра, следовательно, при $A_g < 0$ будет происходить адвекция холодного воздуха, а при $A_g > 0$ – теплого.

На Рис. 24 (район Скандинавии 22 сентября 2020 г. в 12:00 ВСВ) представлены: а) изолинии давления на уровне моря и поле ψ (красная заливка); б) холодные (синяя заливка) и теплые (красная) фронтальные зоны, определенные с использованием (49); в) фронтальные линии, проведенные по гребню поля ψ , с учетом холодных и теплых зон и направления адвекции.

Делая предположение о независимости предикторов, будем для прогноза зон активной конвекции рассчитывать функцию F_e , определяемую следующим образом:

$$F_e = \psi \cdot PV, \quad (47)$$

$$F_e = 0 \text{ если } \psi < k_\psi, PV < k_{pv}, A_g > 0,$$

где k_ψ , k_{pv} – пороговые значения, найденные диссертантом в результате статистической обработки), A_g – признак фронта, определяемый по (49).

При $F_e > 0$ в точке сетки, для которой производился расчет, следует прогнозировать глубокую влажную конвекцию. Как уже говорилось выше, в разделе 4.1, для формирования шквала необходимо учесть распределение ветра в нижней и средней тропосфере по вертикали, поскольку сильный шквал возможен только в результате переноса нисходящим потоком количества горизонтального движения нижней половины тропосферы [14]. Максимальную скорость ветра при шквале, в точках сетки, где $F_e > 0$, можно рассчитать, воспользовавшись методом [25]:

$$U_{\text{макс}} = -4 \cdot 10^{-6} \cdot V^4 + 8.8 \cdot 10^{-4} \cdot V^3 - 0.0618 \cdot V^2 + 1.969 \cdot V, \quad (48)$$

где V – сумма скоростей ветра на стандартных изобарических поверхностях от 1000 до 500 гПа, которая в данном случае рассчитывалась по простой формуле [25]: $V = V_{1000} + V_{925} + V_{850} + V_{700} + V_{500}$.

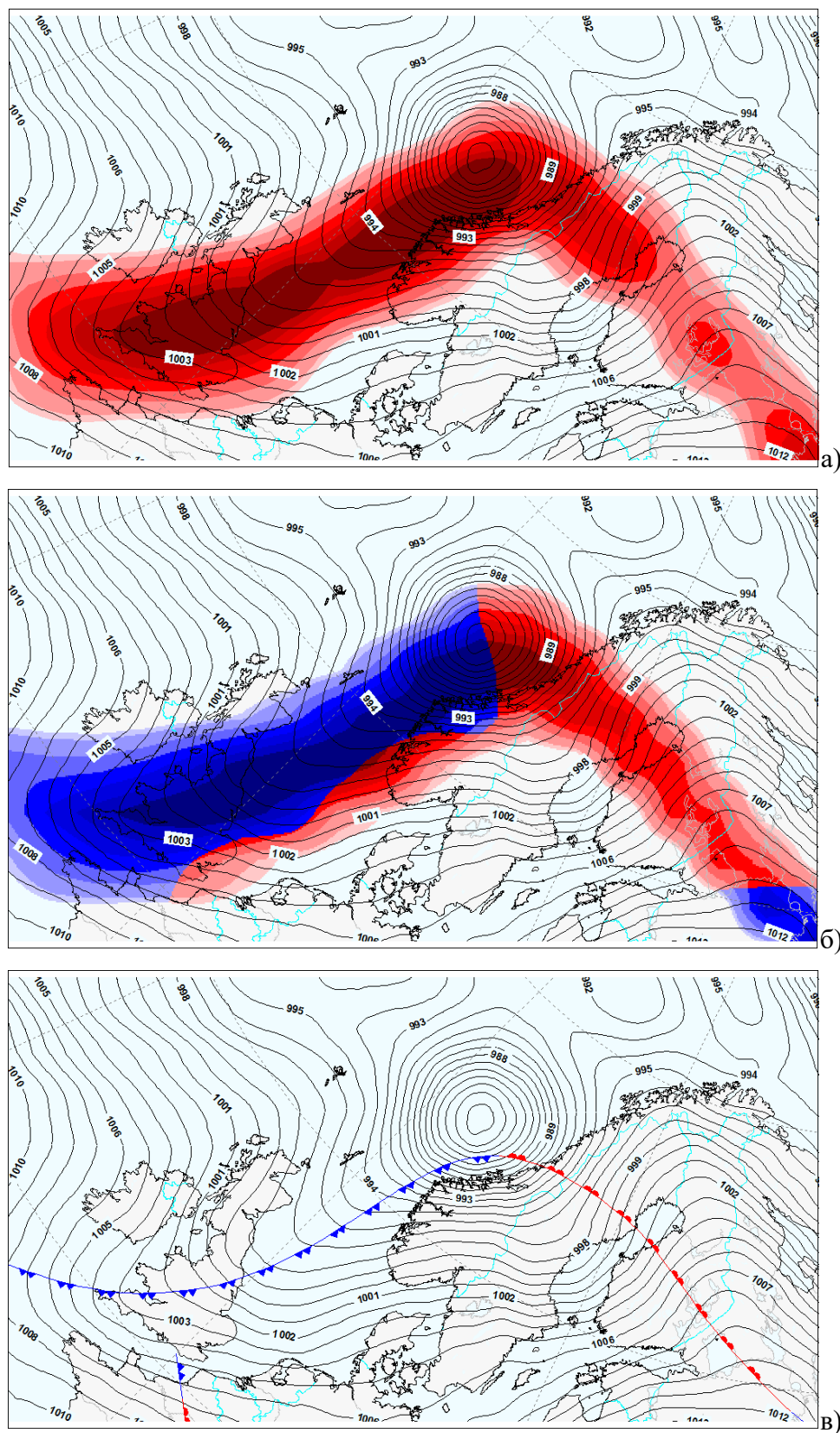


Рис. 24 а) Изолинии давления на уровне моря и поле ψ (красная заливка); б) холодные (синяя заливка) и теплые (красная) фронтальные зоны, определенные по предлагаемому алгоритму; в) фронтальные линии, проведенные по гребню поля ψ , с учетом холодных и теплых зон и направления адвекции.

4.2 Оценка эффективности использования предикторов и качества прогноза шквалов

Для расчета диагностических характеристик (предикторов) и определения их связи со шквалами использовались данные о фактических максимальных порывах ветра на метеостанциях европейской территории России за период с мая по октябрь 2012 г., а также использовались прогностические поля метеовеличин (давление, геопотенциал, температура, ветер, влажность) с заблаговременностью 12 ч по модели AVN Вашингтон на сетке $1 \times 1^\circ$, получаемых в коде GRIB.

Авторская оценка качества прогнозов проводилась в соответствии с методическими указаниями Наставления [27]. Данные о порывах ветра на метеостанциях использовались без осреднения и интерполяции. Рассматриваемые в работе предикторы вычислялись непосредственно для каждой конкретной метеостанции (для сеточных функций применялась билинейная интерполяция). Для каждого анализируемого предиктора находилось пороговое значение, соответствующее сильным ветрам (> 18 м/с). Эффективность каждого предиктора оценивалась с помощью критерия надежности Н. А. Багрова Ba (для редких явлений) и критерия качества Пирси - Обухова [27] PI . Пороговые значения предикторов подбирались таким образом, чтобы получить максимальные значения критерия Ba . Считалось, что сильный ветер возможен только в случае превышения порогового значения представленных предикторов. Полученные на диагностическом материале значения критериев Ba и PI для каждого из предикторов PV , ψ и U_{\max} приведены в Табл. 8.

Для проверки была выбрана Европейская территория России между $43^\circ - 65^\circ$ северной широты и $27^\circ - 57^\circ$ восточной долготы (без части Украины и Казахстана). Оперативные испытания проводились в мае - сентябре 2012 г. по данным модели Вашингтон AVN с шагом сетки $1^\circ \times 1^\circ$. Расчеты проводились по данным за 0 ч. ВСВ, с заблаговременностью 12 ч. Оценка проводилась путем сравнения с данными наблюдений по территории в радиусе, составляющем половину шага сетки по широте для $V_n \geq 18$ м/с. В качестве данных наблюдений брались данные о максимальных порывах ветра между сроками.

В Табл.9 представлена матрица сопряженности для предлагаемого метода.

Оценка успешности разработанного метода прогноза шквалов по результатам испытаний представлена в Табл.10.

Таблица 8

Оценка эффективности прогноза шквалов по модели AVN Вашингтон с использованием предикторов PV, ψ и $U_{\text{макс}}$ по данным наблюдений Прогноз шквалов, предиктор		Наблюдения			Критерий		Пороговые значения предиктора
		$\geq 18\text{м/с}$	$< 18\text{м/с}$	всего	PI	Ba	k
PV $10^{-6} \text{ К}^\circ \text{ м}^2$ / кг с	$\geq 18\text{м/с}$	602	32893	33495	0,01	0,02	0,6
	$< 18\text{м/с}$	182	10347	10529			
	всего	784	43240	44024			
ψ $\text{К}^\circ/\text{м}^2$	$\geq 18\text{м/с}$	565	22356	22921	0,2	0,03	2,5
	$< 18\text{м/с}$	219	20884	21103			
	всего	784	43240	44024			
$U_{\text{макс}}$ м/с	$\geq 18\text{м/с}$	620	29788	30408	0,1	0,02	18
	$< 18\text{м/с}$	164	13452	13616			
	всего	784	43240	44024			

Таблица 9.

Матрица сопряженности результатов испытания метода прогноза шквалов (≥ 18 м/с)

Прогноз	Наблюдения		Всего
	≥ 18 м/с	< 18 м/с	
Шквал ≥ 18 м/с	482	696	1178
< 18 м/с	203	42147	42354
Всего	689	42843	43532

Таблица 10

Оценка успешности разработанного метода прогноза шквалов

Общая оправдыва- емость	Оправдываемость		Предупрежденность		Коэффици- ент ложных тревог	Критерий качества Пирси -Обу- хова	Критерий надежности Багрова
	С явл.	Без явл.	С явл.	Без явл.			
98	41	99	70	98	1.0	0.68	0.51

Из Табл. 10 видно, что основное достижение разработанного метода в резком уменьшении ложных тревог (по сравнению с методами [4, 14, 15, 20]) при сохранении достаточно высокой предупрежденности и оправдываемости такого явления.

4.3 Реализация метода прогноза шквалов и его применение на практике

В качестве исходных данных используются результаты расчетов гидродинамических моделей, распространяемые по глобальной сети телесвязи Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) в коде ГРИБ или ГРИБ2. Для расчета потенциального вихря нашим методом необходимо: 1). данные о температуре, скорости и направлении ветра на изобарических поверхностях от 1000 до 300 гПа, 2). для нахождения фронтальных зон – данные о влажности и геопотенциале в слое от 1000 до 500 гПа. На Рис. 25 представлен пример определения зон сильных шквалов и расчет максимального ветра при шквале. Этот известный случай ураганного ветра в Москве в ночь с 20 на 21 июня 1998 г. подробно описан, например, в [36].

На Рис. 25 представлена прогностическая карта на 0 ч. ВСВ 21 июня 1998 г. На карте – изолинии давления на уровне моря (красные линии) по модели *UKMO*, рассчитанные фронтальные линии с бароклинными зонами по формулам (43-46) (синие и красные зоны соответствуют холодным и теплым фронтальным зонам), изолинии потенциального вихря, на изобарической поверхности 500 гПа (пунктир) и, рассчитанная по разработанному методу, изложенному выше, зона сильных шквалов (закрашенная область), а также рассчитанные по формуле (48) значения максимальных порывов ветра при шквале (цифры). Как было изложено выше, в разделе 4.1, максимальные порывы ветра определялись только в тех узлах регулярной сетки, для которых значение функции F_e было положительным. В остальных узлах сетки использовались прогностические данные о приземном ветре из модели *UKMO*. В виде значков ветра представлены фактические значения максимальных приземных порывов ветра между сроками 21 – 3 ч. ВСВ на синоптических станциях.

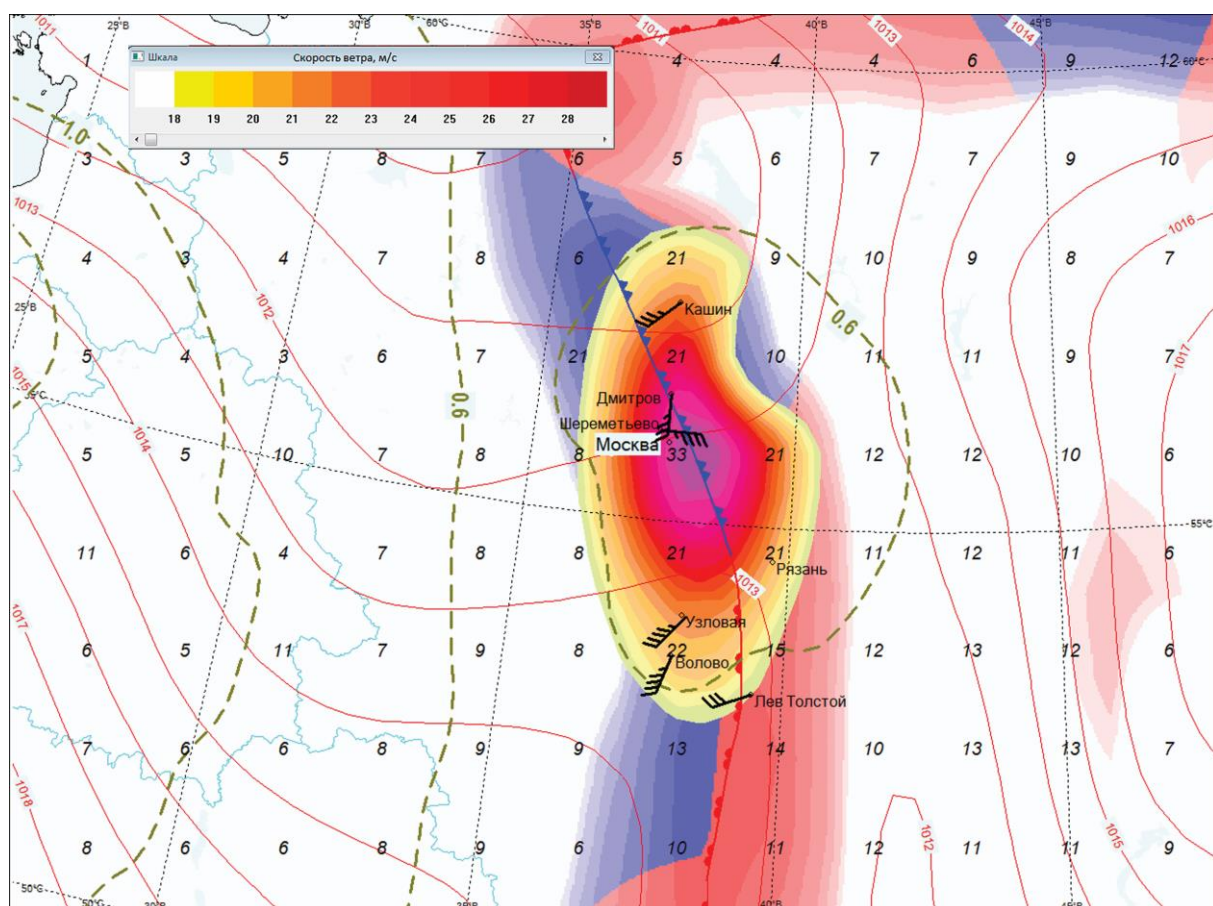


Рис.25. Анализ случая сильных шквалов в ночь на 21 июня 1998 г. в Москве. Фактические порывы ветра на метеостанциях (значки ветра), изолинии давления на уровне моря (красные линии), рассчитанные фронтальные линии и фронтальные зоны (красные и синие - соответственно теплые и холодные), изолинии потенциального вихря на поверхности 500 гПа

(пунктир), рассчитанные максимальные порывы ветра при шквале (цифры) и прогностическая зона сильных ветров, превышающих 20 м/с.

Над Московским регионом видна положительная аномалия потенциального вихря, со значениями превышающими 0.6 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K}^\circ \text{ м}^2 / \text{кг с}$), которая перекрывает находящуюся под ней бароклинную зону. В результате штормового ветра в ночь на 21 июня 1998 г. погибли 11 человек, было повалено более 45 тысяч деревьев. По разным данным, максимальная скорость ветра при шквале в отдельных районах Москвы превышала 30 м/с, однако, по данным метеонаблюдений на станциях в Москве и в ближайшем Подмосковье не было зафиксировано ветра более 20 м/с, за исключением станции в Шереметьево - там были зафиксированы порывы ветра до 22 м/с. Рассчитанная скорость ветра по формуле (48) в Москве составила 33 м/с. В качестве исходных данных в эксперименте использовалась выходная информация по гидродинамической модели *UKMO* (Экзетер).

Выводы

1. Разработан и испытан метод прогноза шквалов с использованием расчета пересечения аномалии потенциального вихря в средней тропосфере с бароклинными зонами в нижней тропосфере.
2. Вычисленные по достаточно объемной выборке оценки успешности прогноза разработанного метода, дают возможность сделать вывод о том, что метод имеет практическую значимость.
3. Разработанный метод может быть включен в оперативную прогностическую модель, что дало бы возможность осуществлять мониторинг условий возникновения и прогноза шквалов с большой детальностью по времени.
4. Метод основан на определении зон активной конвекции, диссертант предполагает, что данный метод может быть применим к прогнозированию и других опасных и неблагоприятных явлений погоды, связанных с глубокой, влажной конвекцией (сильные ливневые осадки, град, грозы).

Глава 5

Исследование структуры тропосферного потенциального вихря масштаба мезо-γ в условиях глубокой влажной конвекции

5.1 Обзор исследований структуры мезомасштабного потенциального вихря в тропосфере

Потенциальный вихрь используется для объяснения и описания динамики структур синоптического масштаба, например при циклогенезе [54], при исследовании волн Россби [52]. PV сохраняет свое значение в частицах, если выполняется условие адиабатичности. Следовательно, изменение PV со временем может служить индикатором диабатического нагрева, например, при выделении скрытой теплоты конденсации, что позволяет использовать прогностические поля PV при прогнозе зон активной конвекции [42, 67]. Обычно, для прогноза зон активной конвекции используется расчет энергии неустойчивости ($CAPE$) - крупномасштабный индикатор конвективной неустойчивости. Однако, информация о стратификации температуры и влажности, это только часть полной картины динамики атмосферы.

Интерес к тому, что представляют из себя структуры потенциального вихря в мезомасштабе (2-20 км) существовал довольно давно. Этот интерес был обоснован тем, что исследователям хотелось понять и объяснить процессы, происходящие в индивидуальной грозовой ячейке.

В 1990 г. появилась работа [63], в которой были теоретически описаны мезомасштабные структуры потенциального вихря в случае образования и развития идеальной грозовой ячейки. В работе [44] были представлены как теоретические рассуждения, так и приведены результаты моделирования. Там же были сделаны предположения, которые были подтверждены результатами моделирования, что мезомасштабные потенциальные вихри в случае глубокой влажной конвекции представляют из себя горизонтально ориентированные диполи с положительными и отрицательными аномалиями в средней тропосфере. Значения этих аномалий примерно на порядок больше, чем в случае потенциального вихря синоптического масштаба в средней тропосфере (до 10 PVU; $1PVU = 1 \times 10^{-6} K m^2 s^{-1} kg^{-1}$). Было объяснено, что эти диполи образуются при развитии грозовой ячейки вблизи конвективного восходящего потока при наличии необходимого сдвига ветра (10 – 20 м/с в слое 0 – 6 км). Это было подтверждено в работе [71], в которой обрабатывались прогностические поля расчетов мезомасштабной негидростатической модели COSMO с шагом 7×7 км с заблаговременностью 3 час.

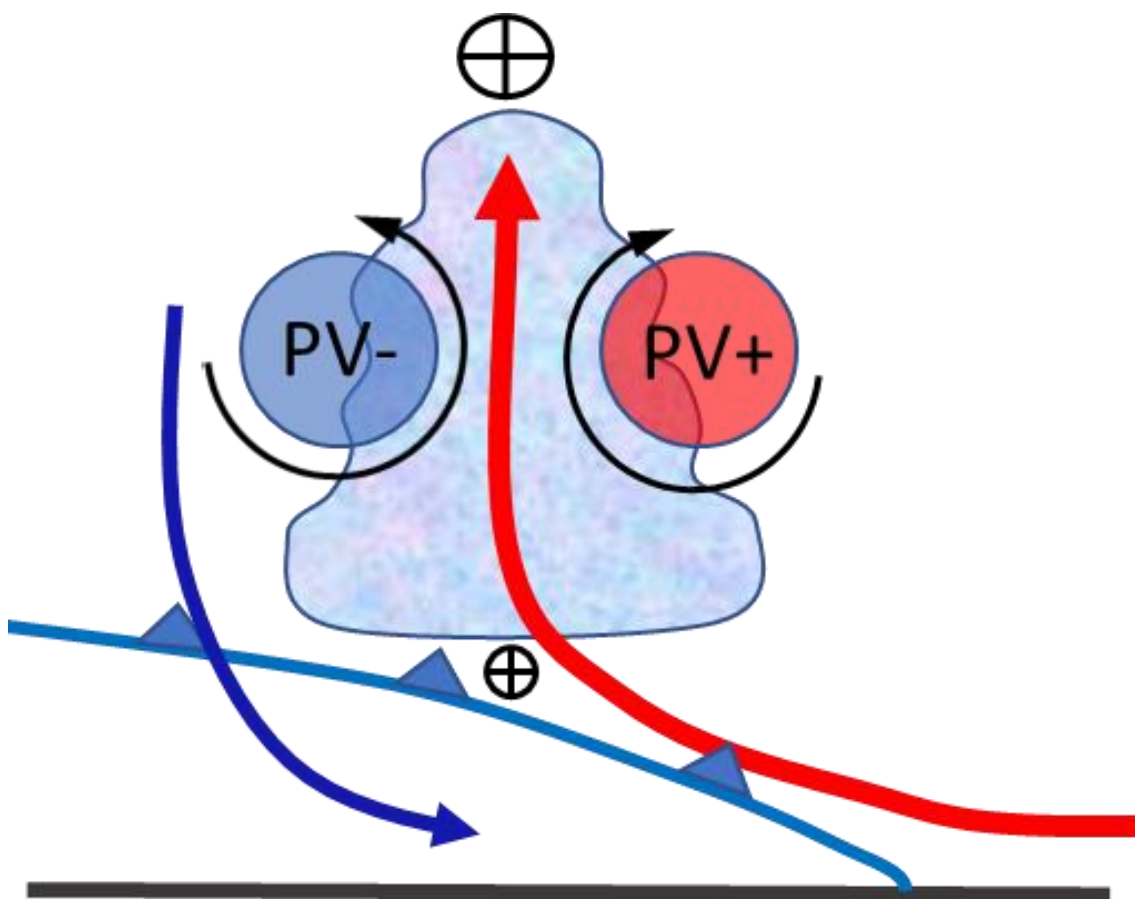


Рис.26. Схема расположения аномалий PV вокруг восходящего конвективного потока.

На Рис.26 представлена схема расположения положительных и отрицательных аномалий PV вокруг восходящего конвективного потока. Так выглядит, согласно [72], конвективный восходящий поток и диполи PV (обозначенные на Рис.26 PV + и PV -), при сдвиге ветра 10 м/с в слое 0-6 км. Под сдвигом ветра здесь имеется в виду векторная разность горизонтальных ветров у поверхности земли и на высоте 6 км. На Рис.26 черный кружок с крестом обозначает оперение стрелки – направление ветра. Согласно проведенным модельным исследованиям [72], значение диполей PV пропорционально величине сдвига ветра, а направление – параллельно направлению вектора сдвига ветра. Необходимым условием для конвективного шторма является наличие сдвига ветра. При сдвиге ветра менее 10 м/с могут образоваться изолированные ячейки и время их жизни будет небольшим (до 60 минут). В [72] приводится примерный расчет жизненного цикла такой ячейки:

$$\tau \sim H/\omega_0 + H/v_i, \quad (49)$$

где H – высота облака, ω_0 – скорость восходящего потока, v_i – скорость падения осадков. Подставив примерные значения $H = 10$ км, $\omega_0 = 5 - 10$ м/с, $v_i = 5 - 10$ м/с, получим время жизни конвективной ячейки от 30 до 60 минут. Увеличение сдвига ветра до 20 м/с может быть

причиной инициализации многоячейковых штормов [60]. Такие штормы могут продолжаться несколько часов и могут включать в себя такие явления, как шквалы, град, интенсивные осадки.

5.2 Исследование структуры мезомасштабного потенциального вихря

С целью исследования структуры мезомасштабного потенциального вихря при глубокой влажной конвекции диссертантом был разработан и реализован алгоритм с использованием мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW. Впервые, с помощью расчетов по выходной информации модели WRF-ARW, удалось воспроизвести теоретически описанные диполи аномалий потенциального вихря вокруг конвективного восходящего потока. В эксперименте использовалась модель WRF-ARW версия 4.1, созданная в NCAR (Национальный центр исследования атмосферы, США) [70], которая является дальнейшим развитием его же мезомасштабной модели MM5 (Mesoscale Model). Модель WRF была создана для научно-исследовательских работ, но применяется в настоящее время и для оперативной работы синоптиков. Поддерживается и развивается эта модель не только NCAR, но и другими метеоцентрами США: NCEP (Национальный центр прогнозов окружающей среды), AFWA (Метеорологическим агентством BBC США), NRL (исследовательской лабораторией ВМС США), FAA (Федеральным управлением по авиации).

WRF-ARW основана на негидростатических уравнениях в форме Эйлера для полностью сжимаемой жидкости, с вертикальной сигма-координатой, следующей за подстилающей поверхностью. Расчет ведется на 40 вертикальных уровнях с использованием схемы Рунге-Кутты 3-го порядка. Начальные условия в модели WRF-ARW могут задаваться аналитически или браться из крупномасштабных анализов и прогнозов. Нами в представленном ниже эксперименте применялся второй вариант инициализации. В качестве начальных и граничных данных использовались данные глобальной модели GFS (Вашингтон) с разрешением 1/8 градуса. Горизонтальное разрешение модели WRF-ARW составляло 6х6 км, результаты расчетов выдавались каждые 10 минут. За основу была взята конфигурация, применяемая в Polar WRF, оптимизированная для работы в высоких широтах [68]. Для параметризации пограничного слоя выбрана схема University of Washington (TKE) Boundary Layer Scheme. Использовалась микрофизическая схема Morrison 2-moment scheme, схема RRTMG для коротковолновой и длинноволновой радиации, Tiedtke Scheme для описания конвективных процессов, схема Noah для процессов в почве. Более подробное описание характеристик, используемых в модели параметризаций приводятся в [70].

Потенциальный вихрь определялся по формуле (16). Обычно, для расчетов синоптического масштаба используется только вертикальная составляющая потенциального вихря,

горизонтальные на два порядка меньше (об этом подробно говорилось в Главе 2). Однако, в случае расчета мезомасштабного (2 – 20 км) *PV*, обязательно необходимо учесть и горизонтальные составляющие, которые могут быть на порядок больше вертикальной составляющей [44].

Для проведения исследований эволюции мезомасштабного потенциального вихря в условиях глубокой влажной конвекции диссертантом был выбран наиболее показательный случай особо опасного метеорологического явления разрушительного шквала, произошедшего в Москве днем 29 мая 2017 года, приведшего к гибели 16 человек и многочисленным разрушениям как в столице, так и в её окрестностях. В Метеорологической обсерватории МГУ шквал был отмечен в период с 12.39 до 12.50 ВСВ [34]. В начале дня Москва находилась в тёплом секторе циклона, смещавшегося в юго-восточном направлении. Центр этого циклона к середине дня находился над Ярославской областью. Максимальная температура достигла в Москве к 12 ч ВСВ 26,4 °С. Данный случай шквала не сопровождался аномально высокими значениями верхней границы облаков по данным радиолокаторов [34]. Конвективный шторм был связан с холодным фронтом, прошедшим Москву днём с большой скоростью. Падение температуры воздуха составило на метеостанции МГУ 10 °С всего за 12 минут: с 25,0 °С в 15.39 до 15.2 °С в 15.51 МСК и 14,9 °С в 15.52 МСК. Именно в эти минуты наблюдалось явление шквала на метеостанции. На Рис.27 показана синоптическая ситуация в 12:00 ВСВ 29 мая 2017 г. На Рис. 28 представлена аэрологическая диаграмма, построенная диссертантом по аэрологическим данным за этот же срок по станции 27612 (г. Долгопрудный, Московская область). Характеристики конвекции, рассчитанные по кривой стратификации, представлены на Рис.29.

Классический подход к решению задачи прогноза конвективных явлений состоит в определении степени конвективной неустойчивости атмосферы [52], однако, значение энергии неустойчивости (CAPE) здесь было небольшим (см. Рис.29) – около 200 Дж/кг, поэтому, прогнозы конвективных явлений на текущий день, рассчитанные с помощью известных индексов неустойчивости (см. раздел 1.1), показывали отрицательный результат. В то же время, рассчитанное по информации мезомасштабной модели WRF-ARW поле потенциального вихря в средней тропосфере, показывало с заблаговременностью до 15 час развитие сильной конвекции в Московском регионе. Глубокая влажная конвекция была реализована благодаря сильному вынуждению из-за быстро перемещающегося фронта (скорость 50 – 60 км/ч). В среднем сдвиг ветра в слое 0 – 6 км составил около 20 м/с.

На Рис.30 (б, г) показаны поля мезомасштабного *PV* в 12 ч. и в 13 ч. ВСВ. На Рис. 30(а, в) представлены данные наблюдений метеорологических радиолокаторов за эти же сроки. На

Рис. 30 видно, что расположение диполей PV , построенных по прогностическим полям, хорошо согласуются с максимальными значениями радиоэха радаров.

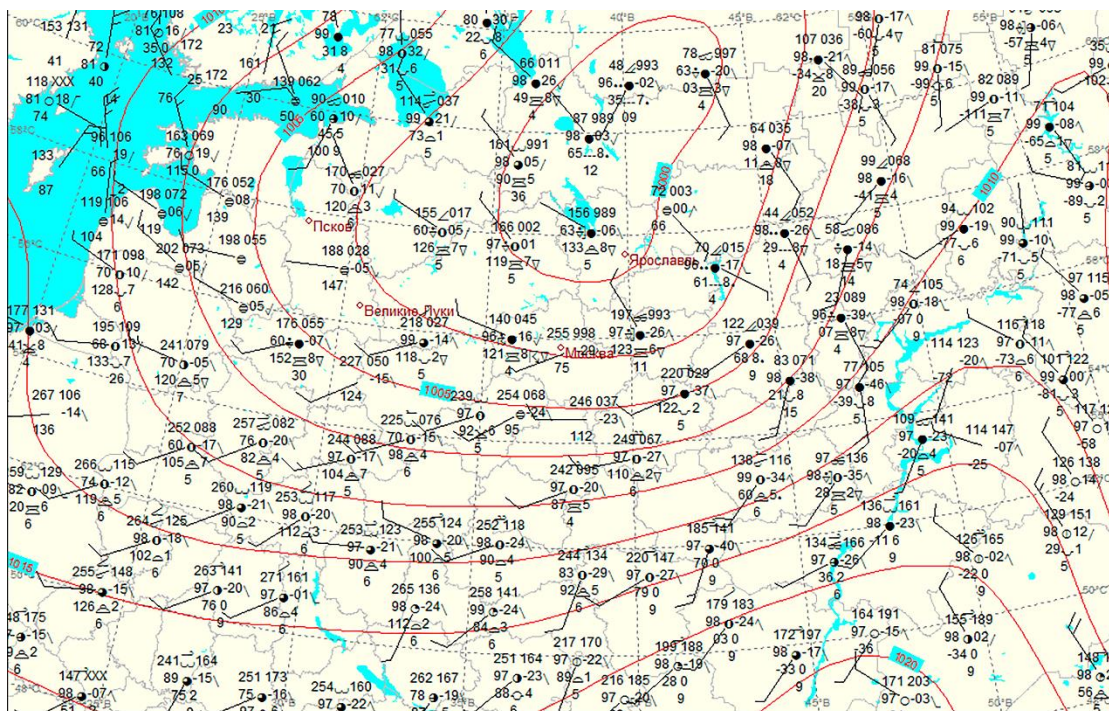


Рис. 27. Синоптическая ситуация, сложившаяся к 12:00 ВСВ 29 мая 2017 г. Изолинии давления на уровне моря и приземная наноска.

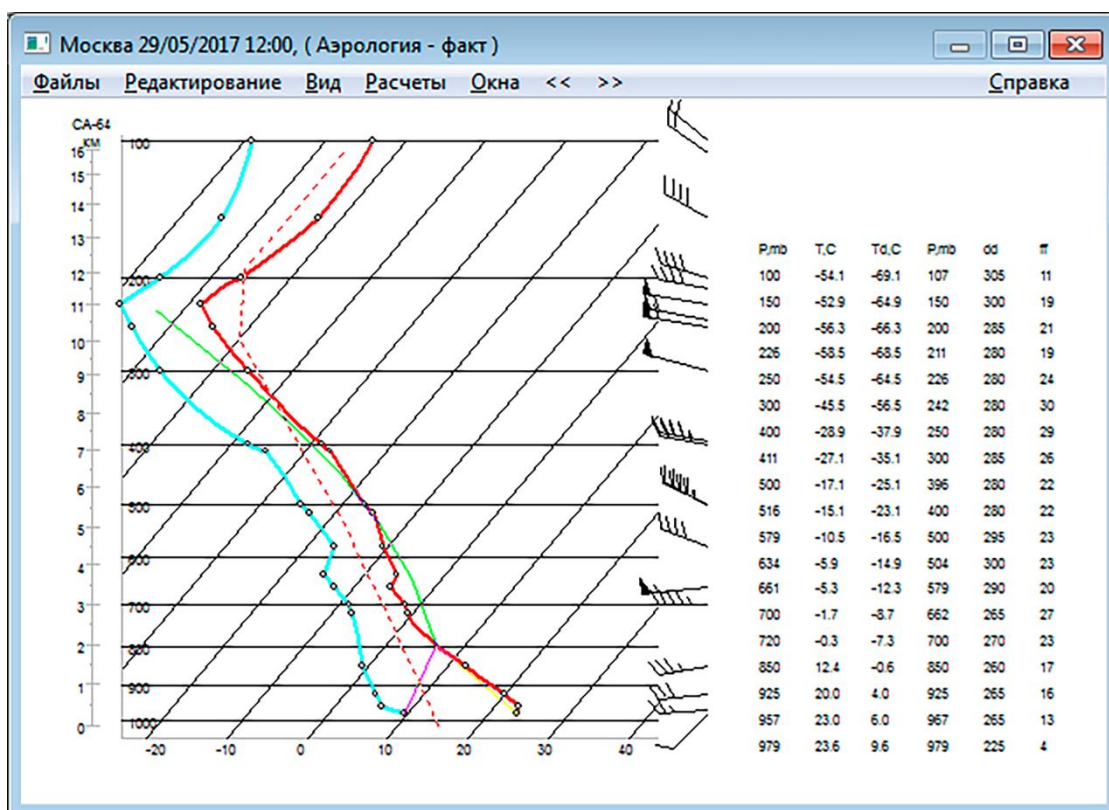


Рис.28. Аэрологическая диаграмма, построенная по данным радиозондирования атмосферы по станции 27612 (г. Долгопрудный, Московская область).

Конвекция						
Параметр	Давление, гПа	Высота, м	Температура, С	Значение		
Уровень конденсации	795	1756	6.4		OK	
Уровень конвекции (выравнивания температур)	459	6068	-21.0		Отмена	
Макс. уровень конвекции (выравн. энергий)	291	9274	-49.0		Печать	
Мощность конвективного облака	336	4312				
Максимальная мощность конвекции	504	7518				
Макс. откл. от кривой стратификации	668	3157	3.0			
Уровень нулевой изотермы	724	2514	0			
Верт. прот. в области отриц. температур	265	3554				
Положит. энергия неустойчивости, Дж				198		
Отриц. энергия неуст. в нижн. слое, Дж				27		
Средняя верт. скорость конвекции, м/с				19		
Среднее откл. от кр. стратификации, С				1.3		
Сумм. дефицит т. р. на 850, 700, 500 гПа, С				28.0		
Лапласиан приз. давления, гПа				-	Справка	

Рис.29. Параметры конвекции, рассчитанные диссертантом по данным радиозондирования, представленным на рис.28

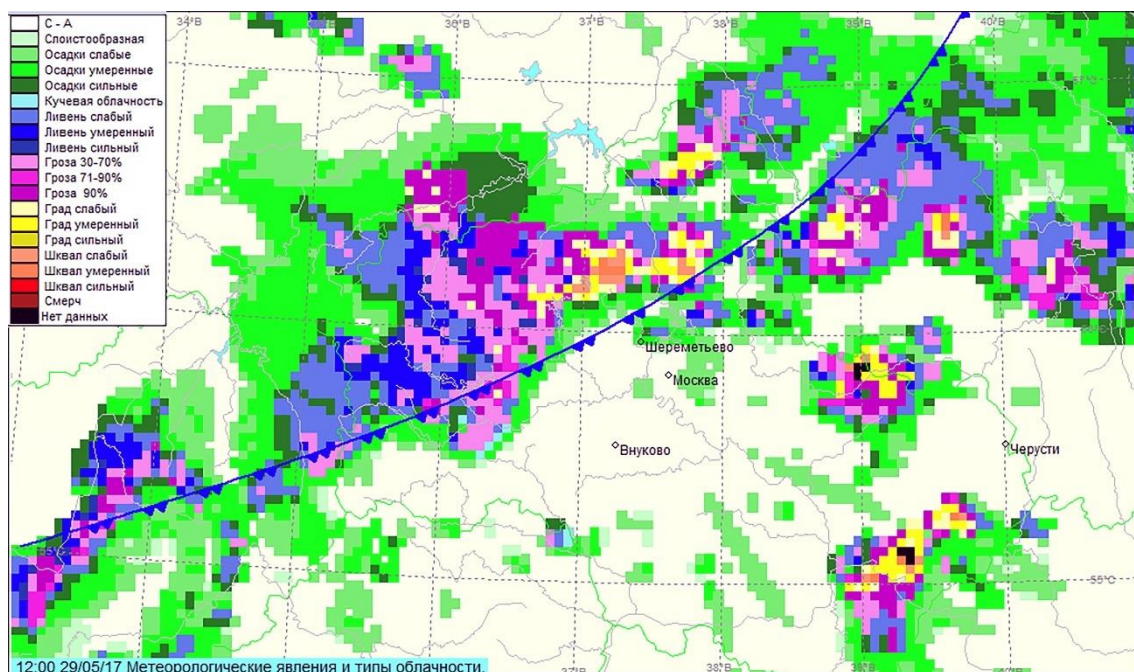
Также видно, что положительные и отрицательные аномалии PV сгруппированы в основном вблизи фронта, проведенного здесь в виде сплошной синей линии. Это объясняется тем, что диполи располагаются горизонтально при условии существования горизонтального градиента температуры. Согласно [44], в баротропной атмосфере, в зоне активной конвекции, диполи располагаются вертикально – положительный внизу, отрицательный – сверху. При горизонтальном температурном градиенте, то есть в бароклинной зоне и при сдвиге ветра – диполи располагаются горизонтально, вблизи конвективного восходящего потока. Угол наклона оси, (соединяющей положительный и отрицательный максимумы диполя [44]):

$$\alpha = \arctg (A/f), \quad (50)$$

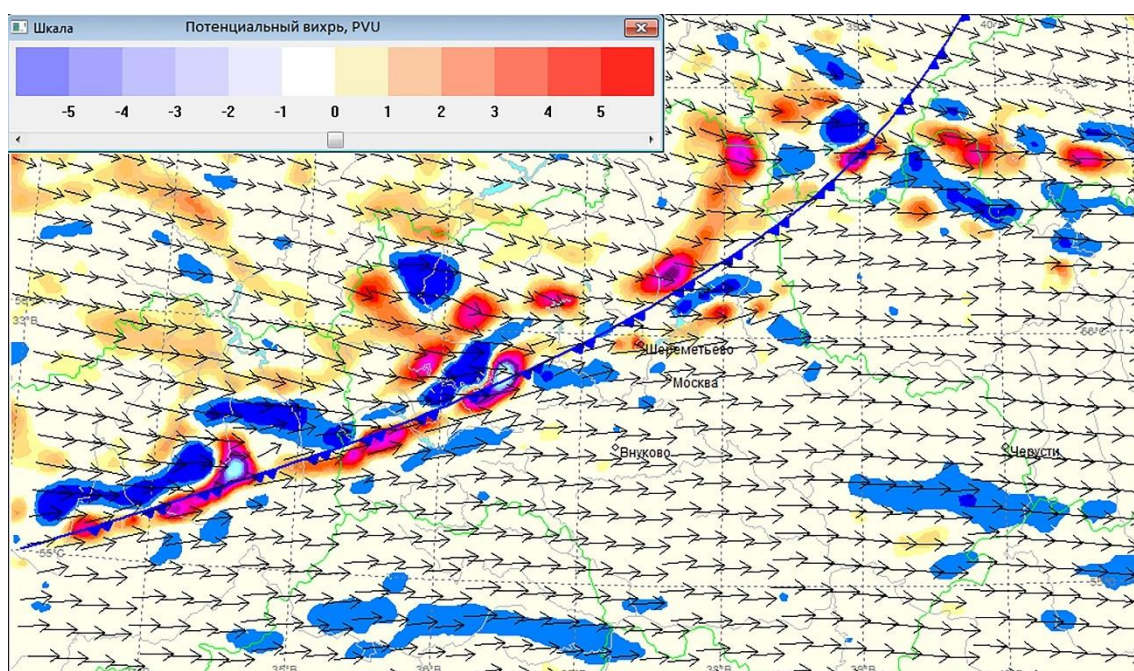
где A - сдвиг ветра, f – параметр Кориолиса.

Отслеживание динамики эволюции диполей в процессе эксперимента проводилось с 10-минутным шагом по времени. В 6:00 ВСВ на расстоянии примерно 130 км от Пскова в направлении юго-востока появились две пары диполей потенциального вихря. Значение этих диполей составляло около 0.6 – 1.2 PVU. Центры диполей находились на расстоянии 30 км друг от друга, горизонтальные размеры положительных и отрицательных потенциальных вихрей составляли 10 – 15 км.

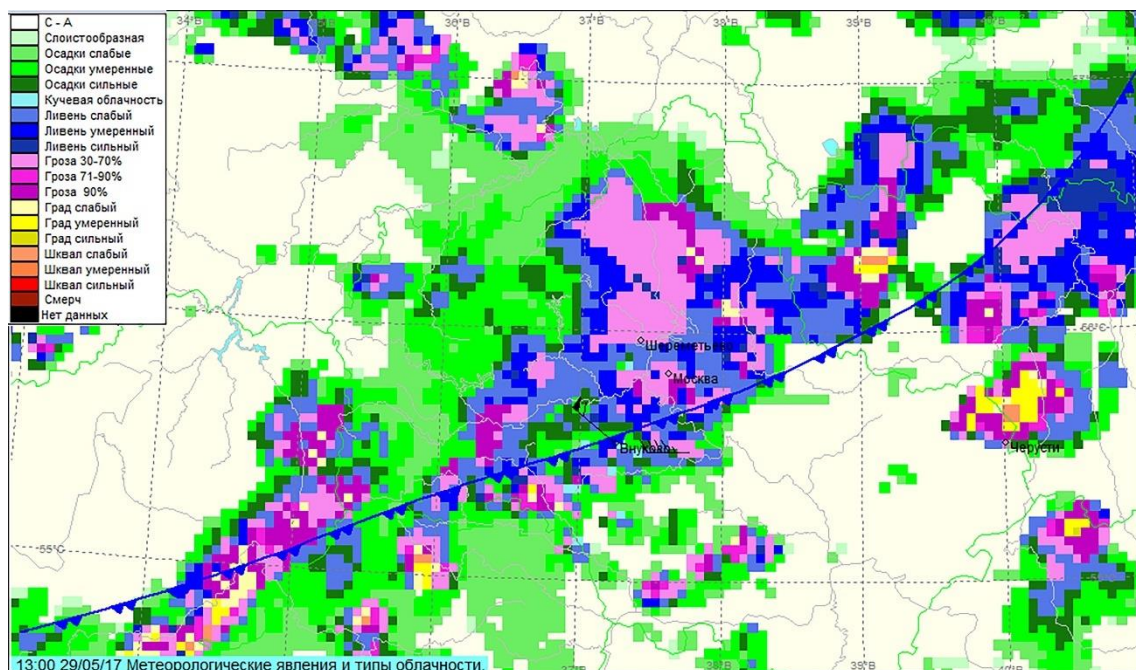
Уже через час (в 7:00 ВСВ) диполи были обнаружены в 180 км от Пскова в направлении юго-востока, количество их увеличилось до 3 пар и максимальные значения потенциального вихря достигли 2.5 PVU. В 8:00 ВСВ диполи достигли Великих Лук, число их увеличилось до 7, максимальные значения были в пределах 2.5 – 4.0 PVU, но ориентация их была преимущественно поперек линии фронта, длина линии фронта составляла около 300 км. В 9:00 ВСВ было уже 12 диполей, протяженность линии фронта составила 420 км, скорость передвижения фронта – 50 км/ч. В 10:00 ВСВ число диполей - 12, максимальные значения 5 - 8 PVU.



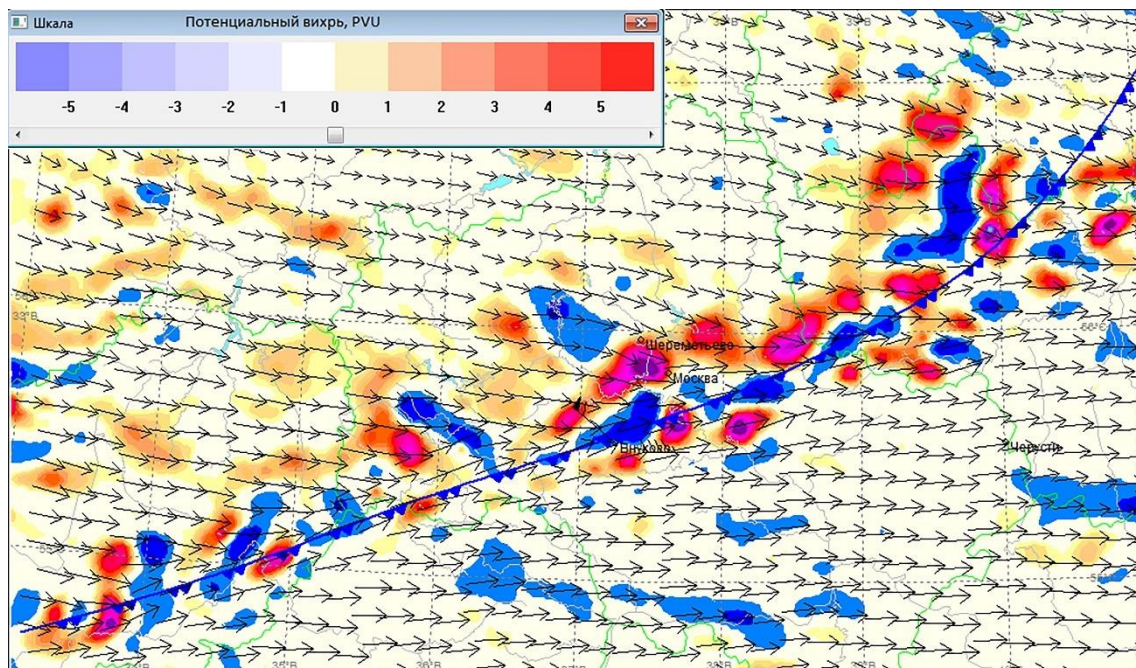
а)



б)



в)



г)

Рис.30. Данные наблюдений по МРЛ (явления погоды) 29 мая 2020 в 12:00 и 13:00 час ВСВ (Рис. а, в) и прогнозы на то же время по данным за 29 мая 2020 0 час ВСВ потенциального вихря на уровне 700 гПа (синие – отрицательные, красные и желтые – положительные аномалии PV), стрелки – горизонтальный сдвиг ветра в слое 0 – 6 км (Рис. б, г), синяя линия – холодный фронт.

В 11:00 ВСВ наметился разворот диполей в направлении линии фронта, протяженность которого составила 470 км. В 11:00 ВСВ – 14 диполей, максимальные значения составляли 10 PVU. Кроме диполей, были замечены и триполи, два положительных потенциальных вихря и

посередине – отрицательный. В 12:00 ВСВ – около 20 диполей, протяженность линии фронта – 900 км, ширина области, в которой сконцентрированы диполи – 40-50 км. 13:00 ВСВ – фронт протянулся от границы с Белоруссией до Ярославля (900 км), максимальные значения диполей составили около 10 - 12 PVU, в районе Внуково и Москвы – триполи с максимальными значениями около 12 PVU. Отрицательные значения PV по абсолютной величине всегда меньше положительных и составляют примерно 50 – 70 %. В промежутке от 12:30 до 13:30 ВСВ в Москве и во Внуково были зафиксированы максимальные порывы приземного ветра, достигшие 28 - 30 м/с. К сожалению, отсутствие автоматических станций, фиксирующих значения скорости ветра с 10 минутным интервалом (или меньше), не позволило провести сравнение прогностических и фактических данных. С 14:00 до 15:00 ВСВ происходило перемещение фронта в направлении юго-востока. В 16:00 ВСВ была замечена вторая линия фронта от Смоленска до границы Московской области с 6 диполями. В 18:00 ВСВ вторая линия фронта достигла Калуги, максимальные значения здесь достигли 6-8 PVU.

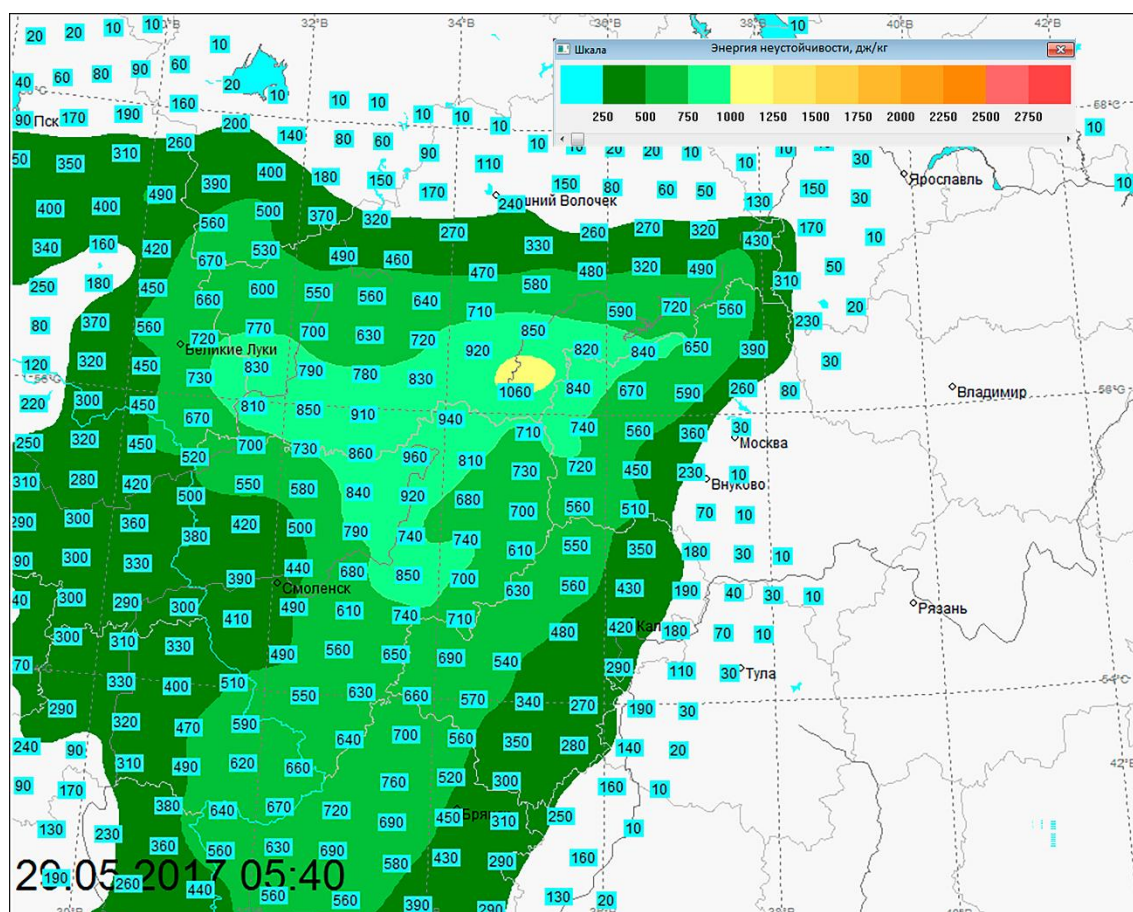


Рис.31. Энергия неустойчивости (CAPE) по информации модели WRF-ARW за 29 мая 2017 г. 0:0 ч. ВСВ, заблаговременность 5 ч. 40 мин.

В районе Великих Лук образовались 4 – 6 пар разрозненных диполей, расстояние между диполями увеличилось до 100 км. В 19:00 ВСВ первая линия фронта прошла Тулу и Рязань, диполи на второй линии – вытянулись по линии фронта и абсолютные значения их увеличились до 10 PVU, в районе Великих Лук – диссипация, уменьшение количества диполей и абсолютных значений PV. Далее до 22:00 ВСВ – расстояние между диполями около первой и второй линиях фронта увеличивается, количество пар уменьшается, отрицательные аномалии PV – исчезают, остаются только положительные, со значением 2 - 4 PVU.

В процессе рассмотрения динамики развития диполей, возник вопрос, что же послужило толчком к образованию этих диполей и явилось триггером для инициализации конвекции. Были проведены расчеты энергии неустойчивости, которые показывали положительные значения в обширном регионе (от Пскова до Москвы и от Минска до Ярославля). Но в районе, где были зафиксированы первые диполи (в 130 км к юго-востоку от Пскова), значения CAPE были меньше, чем, например в Твери или в Великих Луках (Рис. 31). Аэрологическая диаграмма по данным радиозондирования в Великих Луках приведена на Рис. 32. По диаграмме виден сильный сдвиг ветра (около 25 м/с) в слое 0 – 6 км. На Рис. 33 приведены расчеты фронтальных зон и значений потенциального вихря на поверхности 500 гПа, выполненные диссертантом по разработанной методике, представленной в Главе 4, по данным глобальной модели GFS (Вашингтон) с заблаговременностью 6 час.

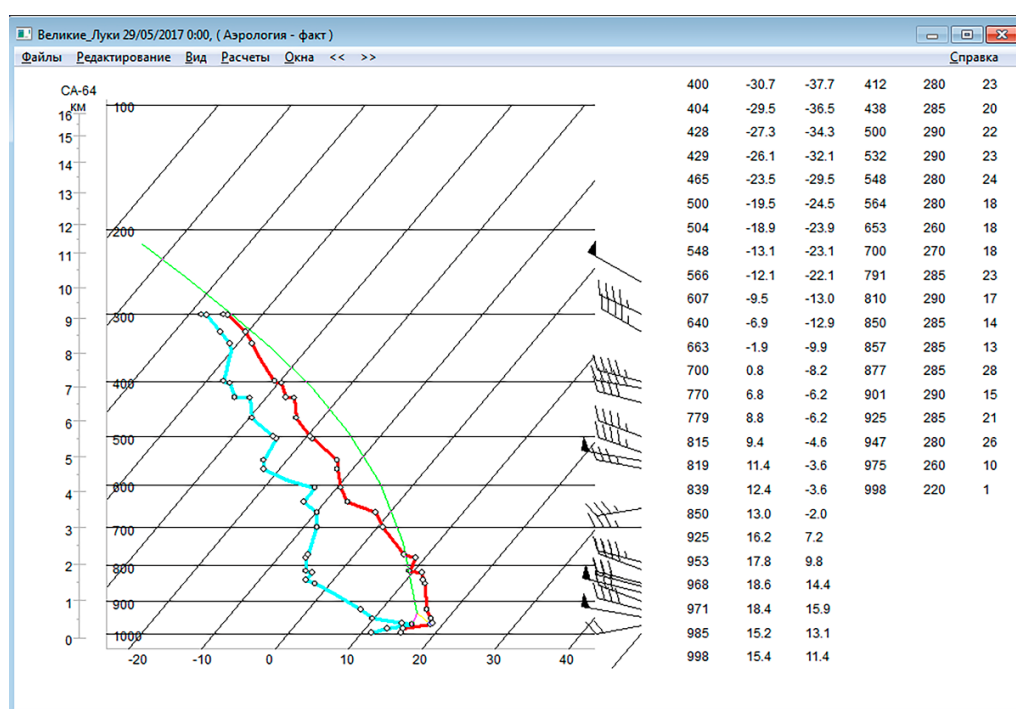


Рис.32. Аэрологическая диаграмма по данным радиозондирования по станции Великие Луки 29 мая 2017 г. 0 ч. ВСВ. Зеленая линия – влажная адиабата.

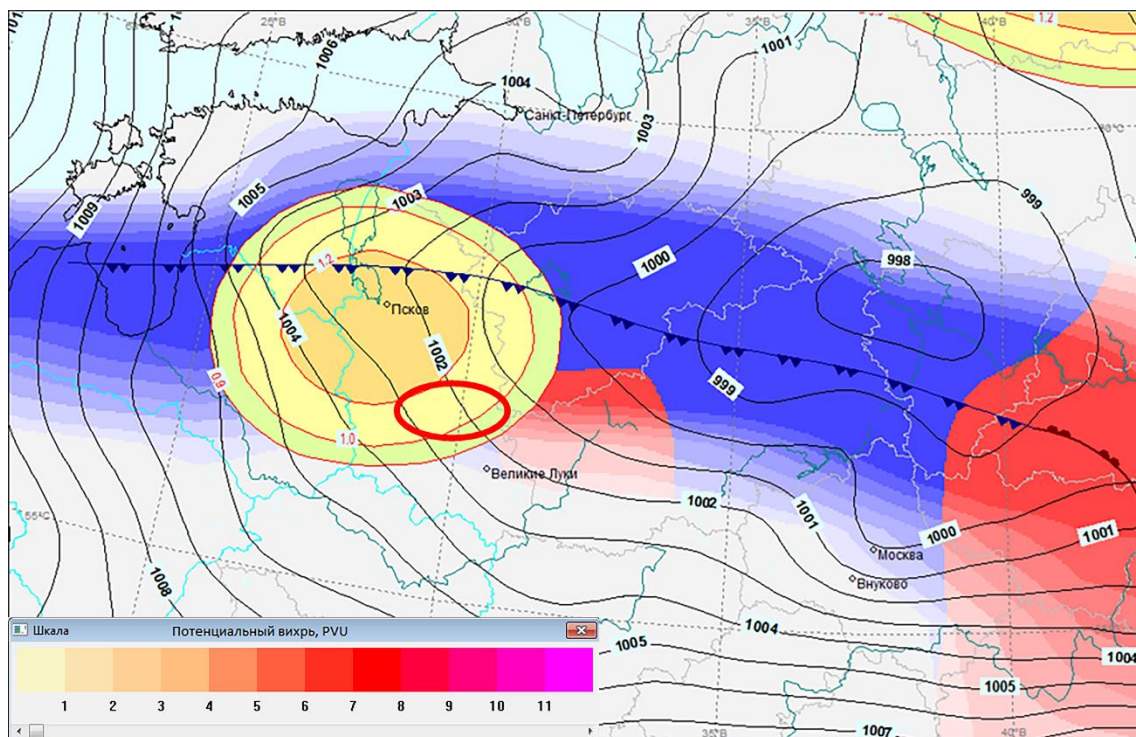


Рис.33. Прогноз давления на уровне моря (изолинии), теплых и холодных фронтальных зон и фронтальных линий, а также потенциального вихря на поверхности 500 гПа (красные изолинии и желтая заливка) по разработанной диссертантом методике для прогноза шквала. Красный овал – место появления первых диполей мезомасштабного потенциального вихря в 5:50 ВСВ 29.05.2017 г.

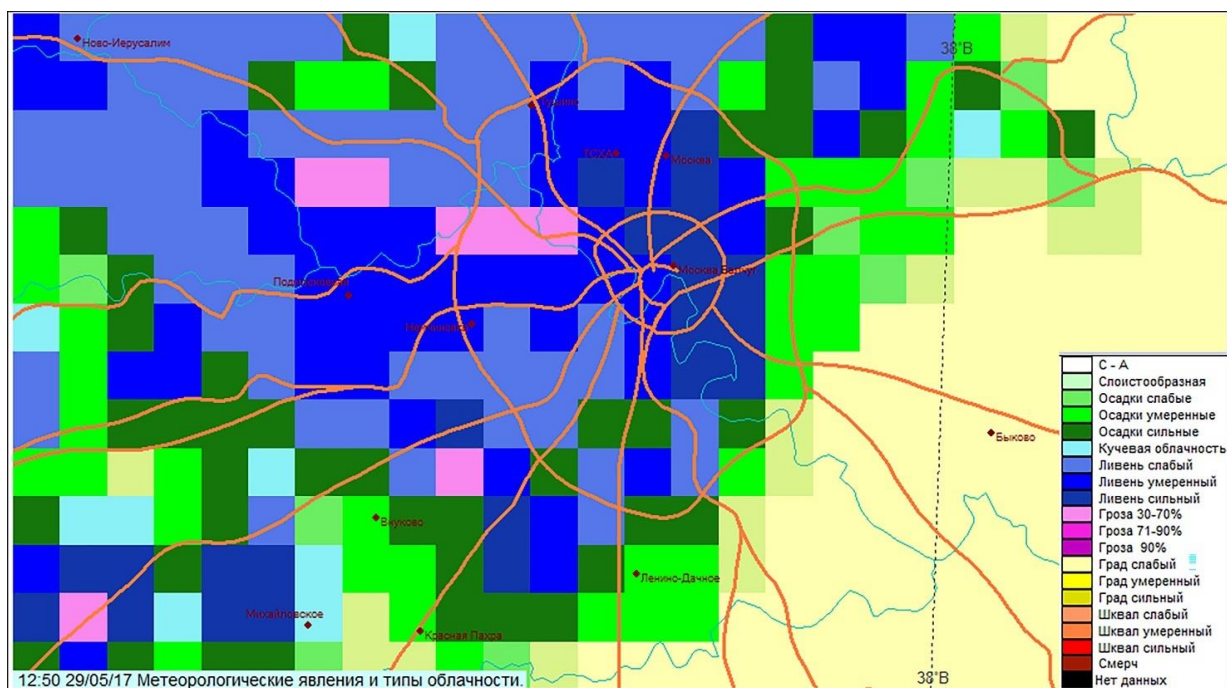
На Рис. 33 видно, что крупномасштабная аномалия потенциального вихря в средней тропосфере оказалась над бароклинной зоной нижней тропосферы. Согласно алгоритму, изложенному в Главе 4, в этом месте, у поверхности земли должно произойти сильное падение давления, которое в итоге может привести к развитию конвекции. По факту падение давления в районе Пскова 29 мая 2017 г. с 6:00 до 12:00 ВСВ составило 6 гПа за 6 час. Красный овал на Рис. 33 – место появления первых диполей мезомасштабного потенциального вихря в 5:50 ВСВ 29 мая 2017 г.

Как уже указывалось выше, грозовая ячейка состоит из восходящего потока и диполя PV , расположенного по разные стороны от восходящего потока. Таким образом, зону восходящего потока можно определить, применив оператор градиента к скалярному полю PV . Максимальные значения $|\nabla[PV]|$ будут приблизительно посередине между положительными и отрицательными аномалиями PV этого диполя, а направление вектора максимальных значений градиента будет перпендикулярно вектору сдвига ветра.

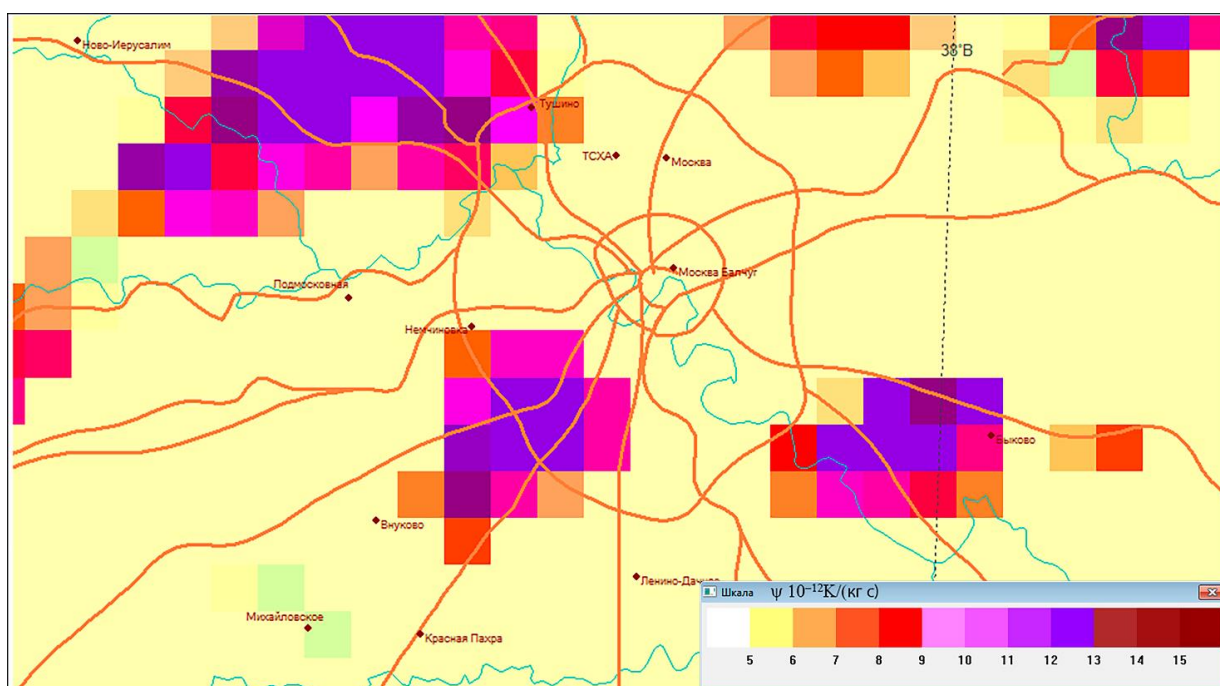
Однако, зона самых сильных порывов ветра всегда сдвинута вперед, к границе между теплым и холодным воздухом. Представив грозовую ячейку как мезофронтальную систему, можно использовать функцию для нахождения фронтального раздела [64]:

$$\psi = \nabla |\nabla PV| \cdot \frac{\nabla PV}{|\nabla PV|}. \quad (51)$$

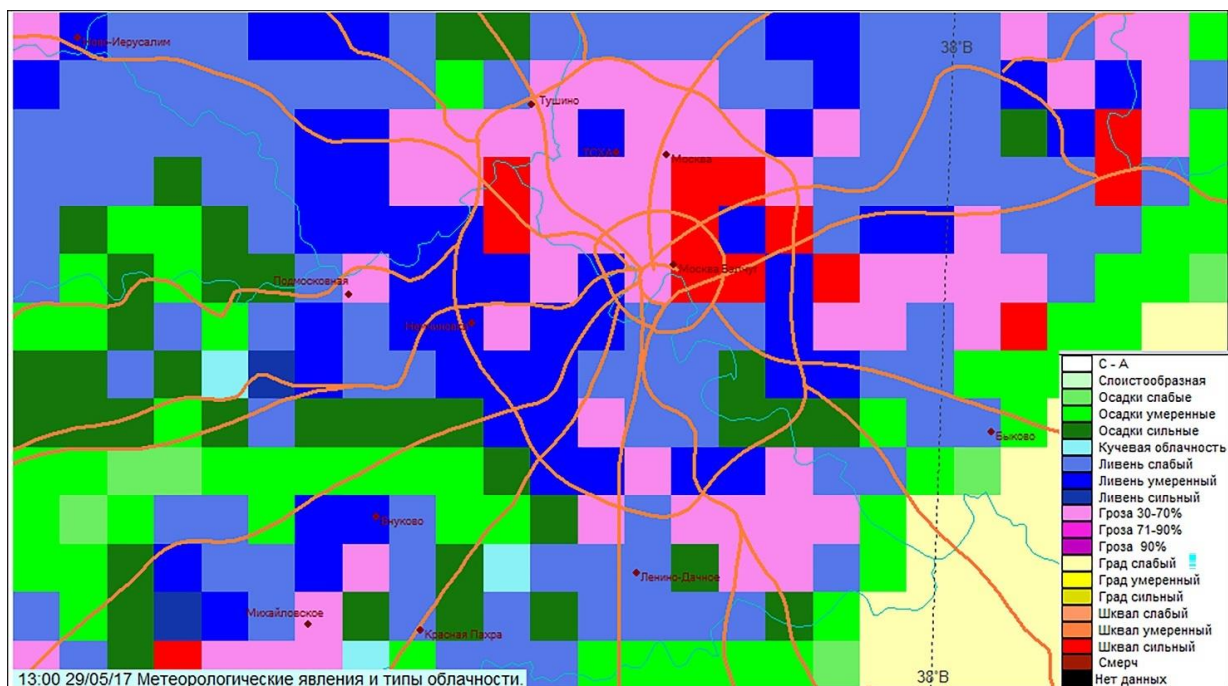
Тогда, можно ожидать, что именно в этом месте, где находится фронт порывистости [52], будут самые разрушительные порывы ветра.



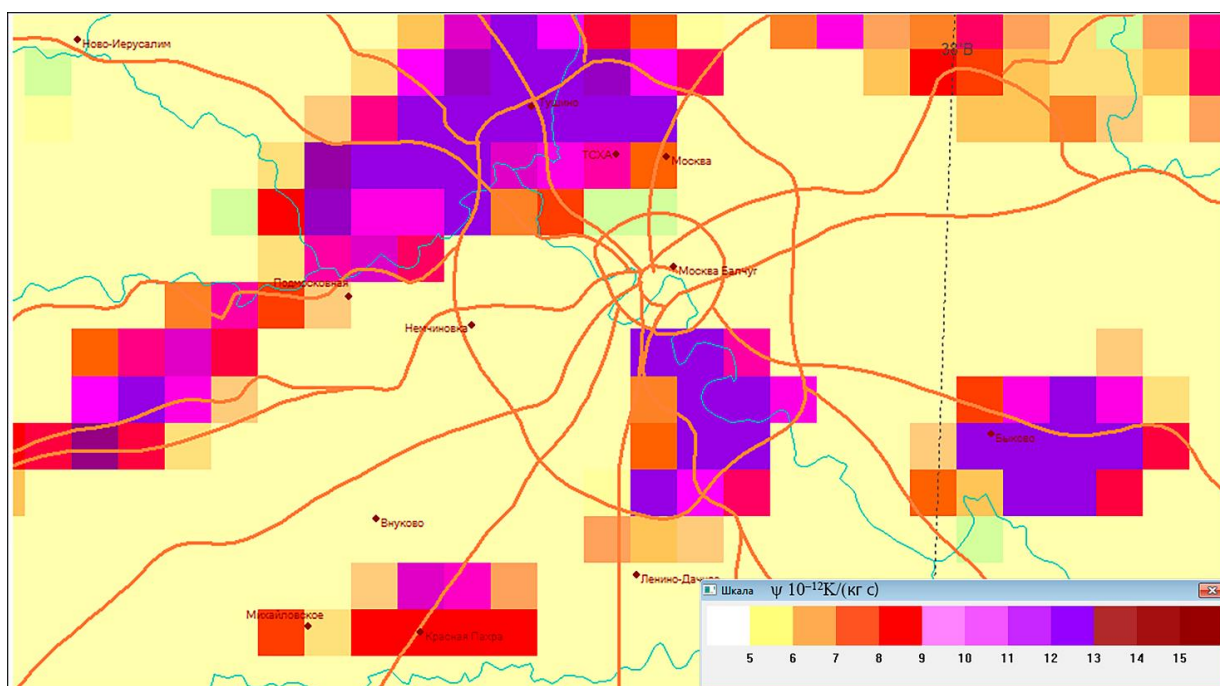
а) 29.05.2017 12:50 ВСВ



б) 29.05.2017 00 ВСВ заблаговременность 12:50.



в) 29.05.2017 13:00 ВСВ



г) 29.05.2017 00 ВСВ заблаговременность 13:00.

Рис.34. Данные наблюдений о метеорологических явлениях и типе облачности по информации МРЛ (Рис. а, в) и прогностические значения поля ψ , с указанной заблаговременностью прогноза (Рис. б, г).

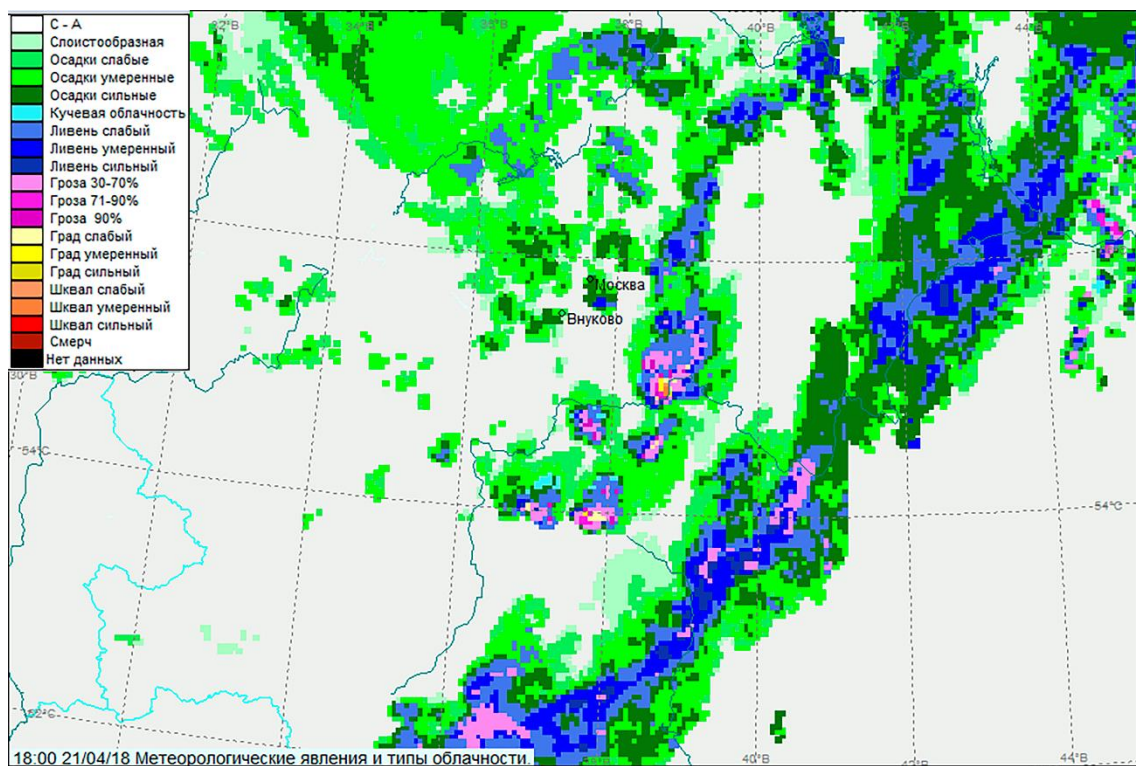
Предложенный алгоритм не вполне корректен. В стационарных точках скалярной гладкой функции f вектор-функция $\nabla f = 0$, а скалярная функция $|\nabla f|$ непрерывна, но, как правило, не дифференцируема. Применение к ней повторно оператора ∇ некорректно. Однако, на практике эта проблема диссертанту не встречалась, скорее всего потому, что при разностной аппроксимации оператора ∇ подобные проблемы "смягчаются".

На Рис. 34 (а, в) представлено поле явлений погоды по данным МРЛ за сроки 12:30 - 13:00. На Рис. 34 (б, г) представлено поле ψ , построенное по прогностическим полям PV с 10 минутным шагом с заблаговременностью к срокам, соответствующим фактическим срокам наблюдения МРЛ. По [34] с 12:40 до 12:50 ВСВ время были зафиксированы порывы ветра 28 м/с на станции МГУ и 30 м/с на станции Внуково. По рисункам видно, что максимальные значения прогностического параметра ψ и значения радиоэха, соответствующие сильной грозе довольно близки. И практически совпадает скорость перемещения зон опасных явлений по данным МРЛ и поля ψ .

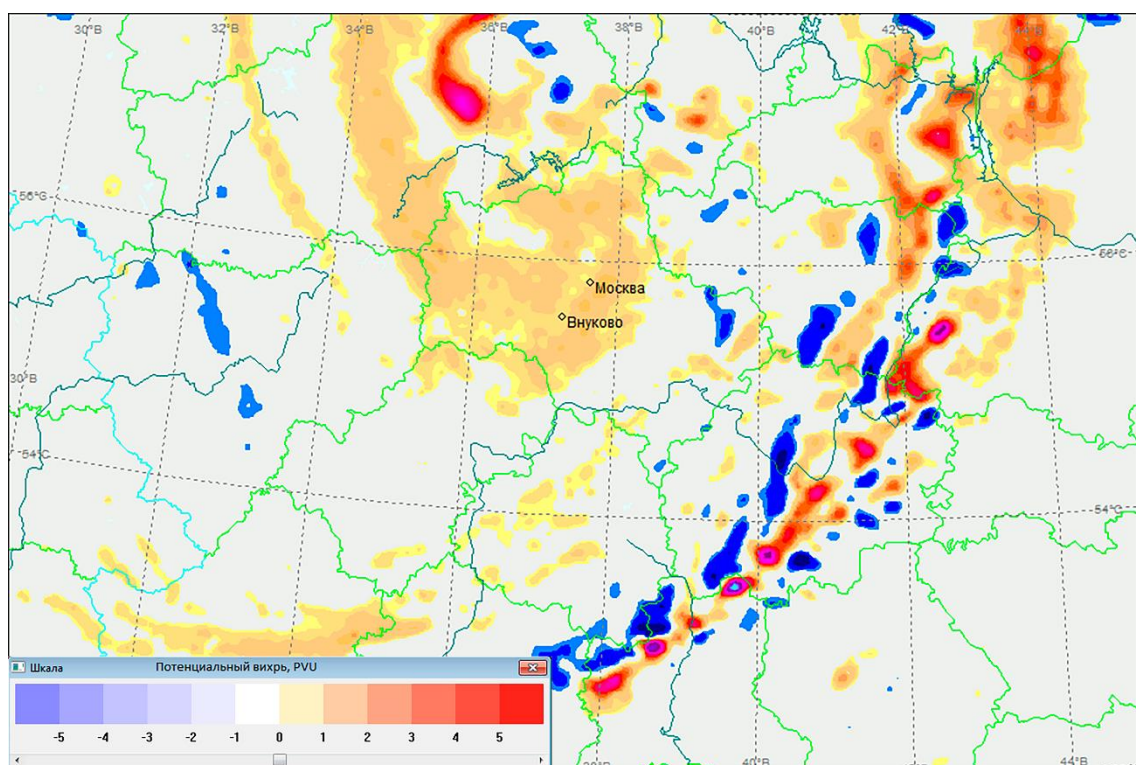
Аналогично представленному эксперименту было исследовано 18 случаев конвекции в центральном регионе России в период с 15 апреля до 30 сентября 2020 г. Во всех случаях конвекция сопровождалась образованием горизонтально ориентированных диполей потенциального ветра в средней тропосфере. Хотя, следует отметить, что, видимо, в результате несовершенства гидродинамической модели, в 5 случаях место образования диполей находилось на расстоянии 100 – 150 км от фактической грозовой зоны. Зоны конвекции проверялись по данным метеорологических радиолокаторов. На Рис.35 (а) представлены данные радиолокаторов за 18:00 ВСВ 21 апреля 2018 г., на Рис. 35 (б) прогноз поля потенциального вихря на поверхности 700 гПа, рассчитанный по выходной информации модели WRF-ARW с заблаговременностью 6 час.

На Рис.36 (а) представлены данные радиолокаторов за 12:30 ВСВ 17 сентября 2020 г., на Рис. 36 (б) прогноз поля потенциального вихря на поверхности 700 гПа, рассчитанный по выходной информации модели WRF-ARW с заблаговременностью 6 ч 30 мин.

Кроме уже описанных в этой главе исследований в теплый период года, был также исследован один случай сильного снегопада, прошедшего в Москве 17 апреля 2020 г. И в этом случае, с помощью расчетов по выходной информации модели WRF-ARW, были воспроизведены диполи потенциального вихря в средней тропосфере. Это позволяет сделать предположение о возможности применения расчета мезомасштабного потенциального вихря для прогноза конвективных явлений в холодное время года.

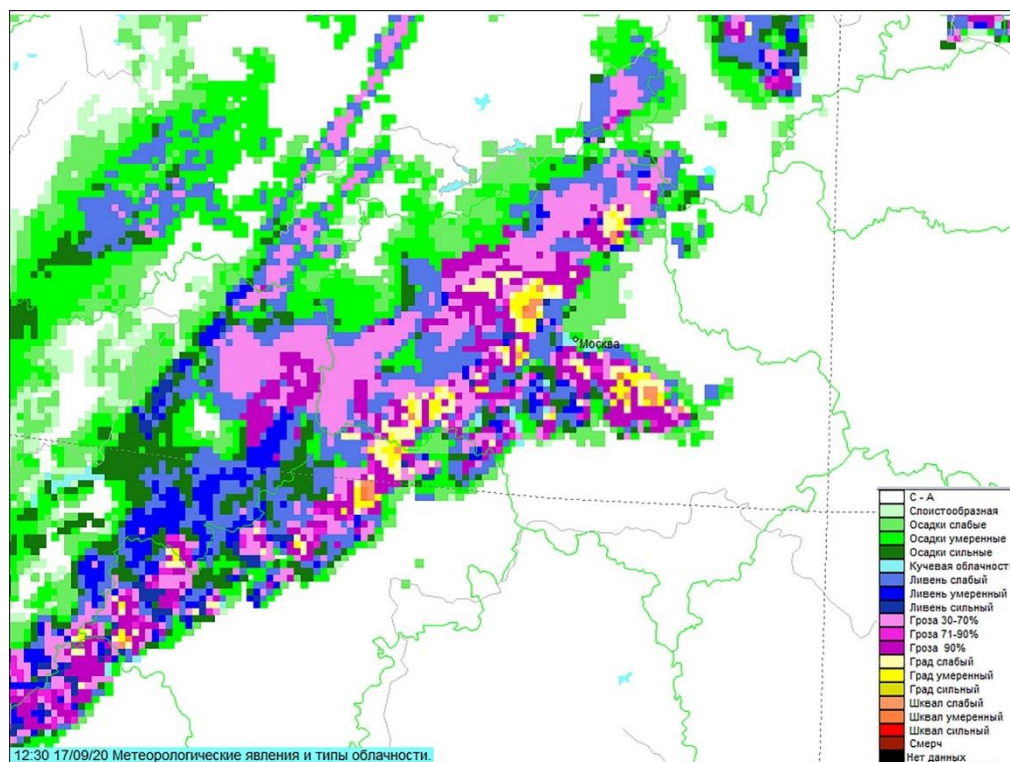


а)

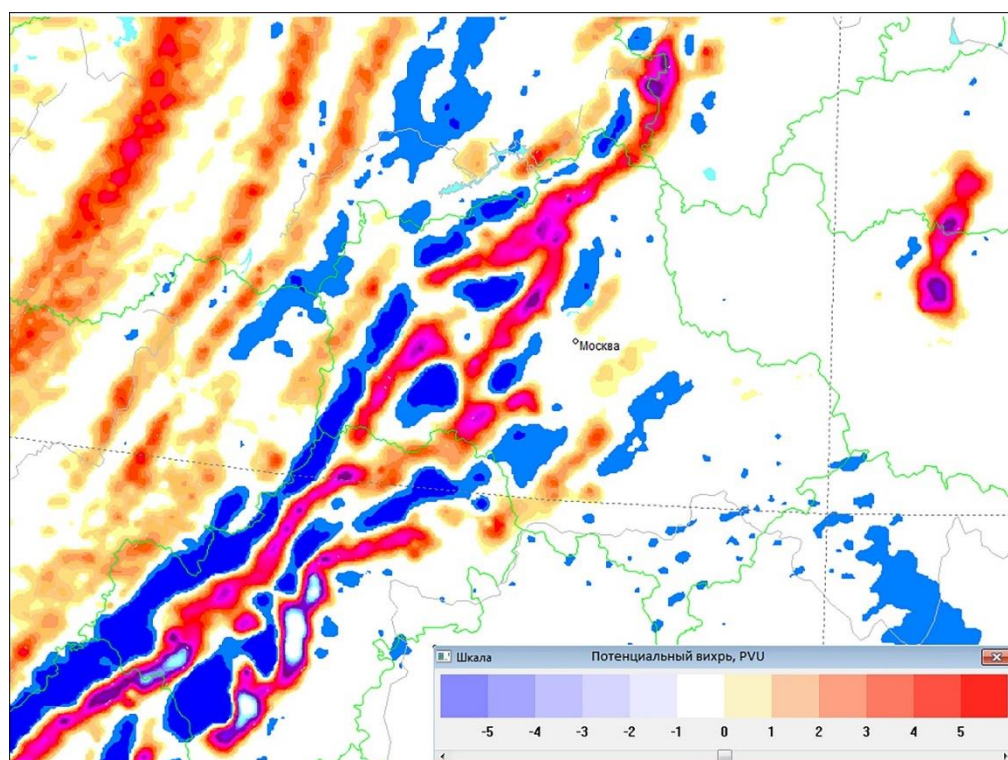


б)

Рис. 35. Явления погоды по данным МРЛ за 18:00 ВСВ 21 апреля 2018 г. (а) и прогностические поля потенциального вихря на 700 гПа с заблаговременностью 6 ч., рассчитанные по информации WRF-ARW за 12:00 ВСВ 21 апреля 2018 г.



а)



б)

Рис. 36. Явления погоды по данным метеорологических радиолокаторов за 12:30 17.09.2020 ВСВ (а), прогноз тропосферного потенциального вихря с заблаговременностью 6 ч. 30 мин по информации модели WRF-ARW на поверхности 700 гПа (б). Положительные аномалии PV – красные, отрицательные – синие.

Для оценки успешности применения поля ψ для прогноза конвекции сравнивались прогнозы, выполненные по полям ψ , рассчитанным по модели WRF-ARW, и принятыми за эталон показания метеорологических радиолокаторов за июль месяц 2020 г. по Центральному Федеральному округу, см. Рис.34. Прогноз считался оправдавшимся, если в узле сетки 4x4 км в поле «явления погоды по данным радиолокатора» показывало одновременно с нашим прогнозом ливень, грозу, шквал или град.. Пороговым значением для наличия явления в нашей методике являлось выполнение неравенства $\psi \geq \psi_* = 0.6 \cdot 10^{-12} \text{ c}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$. Заблаговременность прогноза здесь составляла 6 ч для исходных сроков 0 и 12 ч. Результаты по точкам сетки помещены в Таблицу 11.

Таблица 11

Матрица сопряженности прогноза с помощью прогностической функции ψ , рассчитанной по модели WRF-ARW, с данными о конвективных явлениях по данным метеорологических радиолокаторов.

Прогноз	Наблюдения		Сумма	U	U + П
	Конвекция	Без конвекции			
Явление конвекции $\psi \geq 0.6 \cdot 10^{-12} \text{ c}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$	476457	184915	661372	0.88	1.54
Без явления конвекции $\psi < 0.6 \cdot 10^{-12} \text{ c}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$	240071	2623509	2863580	0.72	1.64
Сумма	716528	2808424	3524952		
П	0.66	0.92			
T	0.59				
H	0.63				
ETS	0.45				
ColT	0.25				

где U - оправдываемость, П - предупрежденность, T - критерий качества прогноза Пирси-Обухова, H - критерий надежности Багрова-Хайдке, ColT – коэффициент ложных тревог [27].

Диполи PV находятся в горизонтальной плоскости в случае существования конвективного восходящего потока, в бароклинной зоне (при горизонтальном градиенте температуры) и при сдвиге ветра не менее 6 м/с в слое 0 - 6 км. Поэтому, предлагается использовать оперативные расчеты мезомасштабного PV в тропосфере для прогноза зон активной конвекции.

Использование фронтального поля ψ позволяет локализовать место наибольших порывов ветра при глубокой влажной конвекции. Необходимо провести дополнительные исследования, но можно предположить, что эти результаты позволят существенно повысить качество прогноза опасных и неблагоприятных явлений, связанных с глубокой влажной конвекцией. Для валидации полученных результатов необходима сеть наземных автоматических станций, расположенных не далее 20 км друг от друга с выдачей приземных параметров не реже, чем раз в 10 минут.

5.3 Технология наукастинга в архитектуре АРМ Синоптика

По определению Всемирной метеорологической организации, наукастингом называется детальное описание текущей погоды и прогноз в пределах 6 часов от срока наблюдения.

Развитие наукастинга обусловлено необходимостью получения как можно более точных прогнозов начала, продолжительности и интенсивности явлений погоды в условиях сильной изменчивости атмосферных процессов. Основными объектами наукастинга являются явления погоды, связанные с активной конвекцией (грозы, шквалы, град, ливни).

Для сверхкраткосрочного прогноза конвективных явлений в метеорологической практике обычно применяются данные метеорологических радиолокаторов, информация геостационарных спутников. Задача решается путем переноса текущего положения зон активной конвекции в направлении, определенном либо путем экстраполяции, либо по прогностическим полям ветра на высоте ведущего потока (700 – 500 гПа) [18, 76]. Иногда применяется смешанный способ для построения траекторий: в первые полчаса больший вес имеют данные экстраполяционного метода, а далее – данные из гидродинамических моделей.

В данном разделе представлена система наукастинга, позволяющая рассчитывать и выводить на экран оператора детальные прогнозы в пределах 6 часов от срока наблюдения зон активной конвекции, а также других параметров, прогноз которых необходим в пределах ближайших часов – температуры воздуха, видимости, высоты нижней границы облаков, осадков, порывов ветра.

В последние годы значительно возросло качество результатов расчета мезомасштабных негидростатических моделей для краткосрочного и сверхкраткосрочного прогноза погоды. В описываемой комплексной системе наукастинга в настоящее время используется модель WRF-ARW версия 4.1, описание ее приведено в разделе 5.2.

В [37] описано программное средство для производства наукастинга конвективных явлений. Будущее положение зон радиолокационной отражаемости рассчитывалось с использованием полей ветра из глобальных прогностических моделей, с коррекцией скорости и направления перемещения, определенной по экстраполяционному методу. Это программное

средство успешно применялось для прогноза времени подхода зон осадков к локальным объектам при метеорологическом обеспечении XXII Олимпийских игр в 2014 г. Необходимая информация для расчетов – данные МРЛ и результаты расчетов гидродинамических моделей поступали по Глобальной сети телесвязи ВМО.

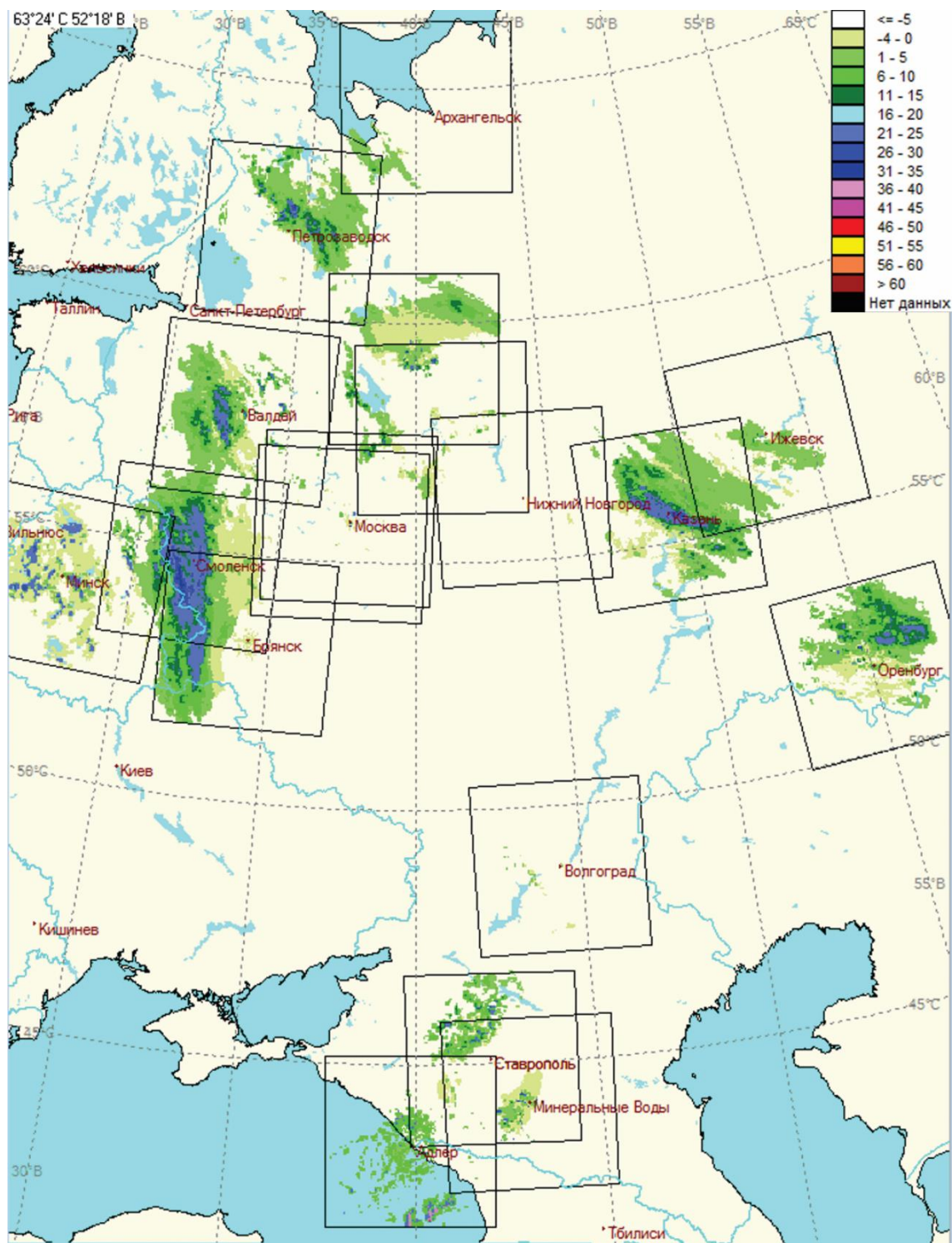
В числе выходных полей модели WRF-ARW есть результаты имитации радиолокационной отражаемости. Радиолокационная отражаемость моделируется по прогностическим значениям отношения смеси гидрометеоров на различных уровнях с учетом рассеяния Релея на сферических частицах известной плотности и размеров. С целью получения более полной картины и покрытия мест, где отсутствует информация от МРЛ предлагается совместно использовать фактическую и прогностическую (соответствующей заблаговременности) радиолокационную отражаемость. При этом, в соответствии с алгоритмом, изложенном в [37] поля фактической радиолокационной отражаемости перемещаются и смешиваются (технология блендинга) с прогностической радиолокационной отражаемостью, полученной от WRF-ARW. В России метеорологические радиолокаторы (МРЛ) имеют достаточно плотную сеть только в Европейской части, но даже здесь есть места, где информация от МРЛ не перекрывается, а учитывая, что некоторые станции временами не передают информацию - воссоздать реальное синоптическое положение бывает достаточно сложно. Ожидается, что предлагаемая схема даст возможность дежурному синоптику лучше представить истинную картину процессов, происходящих в атмосфере, и позволит точнее дать прогноз таких явлений как ливни, грозы, шквалы, град.

В соответствии с построенным алгоритмом, для расчетов используется полученная по модели WRF-ARW радиолокационная отражаемость как на отдельных изобарических поверхностях, так и максимальная в тропосфере. Далее, эта информация стыкуется с данными о фактической радиолокационной отражаемости. При удалении от центральной точки радиолокатора на расстояние более 100 км, вес прогностической информации увеличивается и достигает 1 в неосвещенных местах.

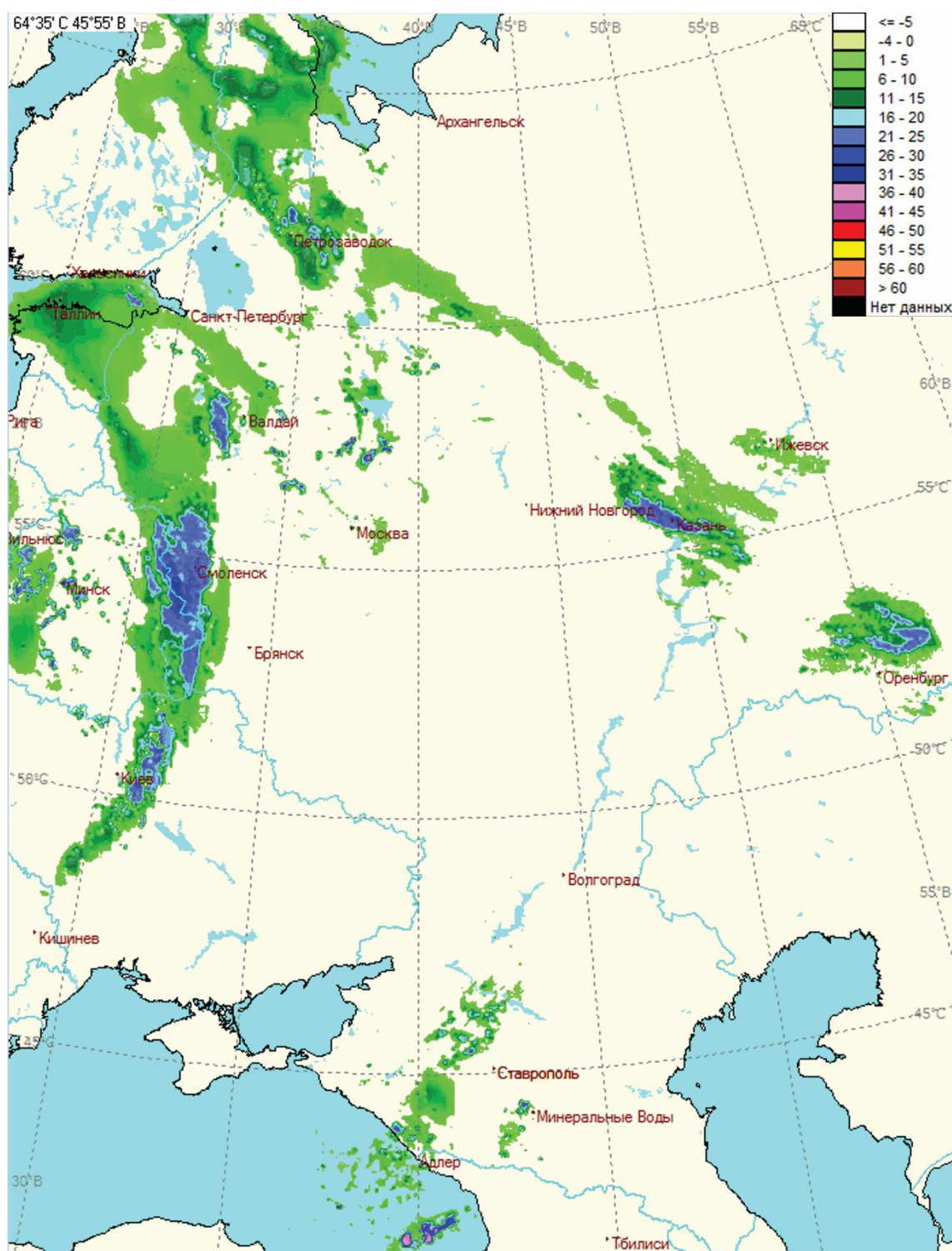
Для построения прогностического положения радиоэха используется траекторная модель, построенная на изобарической поверхности, соответствующей максимальной радиолокационной отражаемости [66].

На Рис.37 (а) представлена карта радиолокационной отражаемости по данным метеорологических радиолокаторов за 8 ноября 2015 г. 15 ч ВСВ. Зоны покрытия локаторов обведены черными прямоугольниками. На Рис. 37 (б) - прогноз с заблаговременностью 2 ч положения зон радиолокационной отражаемости, выполненный по стыкованным данным о фактической радиолокационной отражаемости за 8 ноября 2015 г. 13 ч ВСВ и прогностической

радиолокационной отражаемости по модели WRF-ARW, рассчитанной с заблаговременностью 7 ч по данным за 8 ноября 2015 г. 6 ч ВСВ.



a)



б)

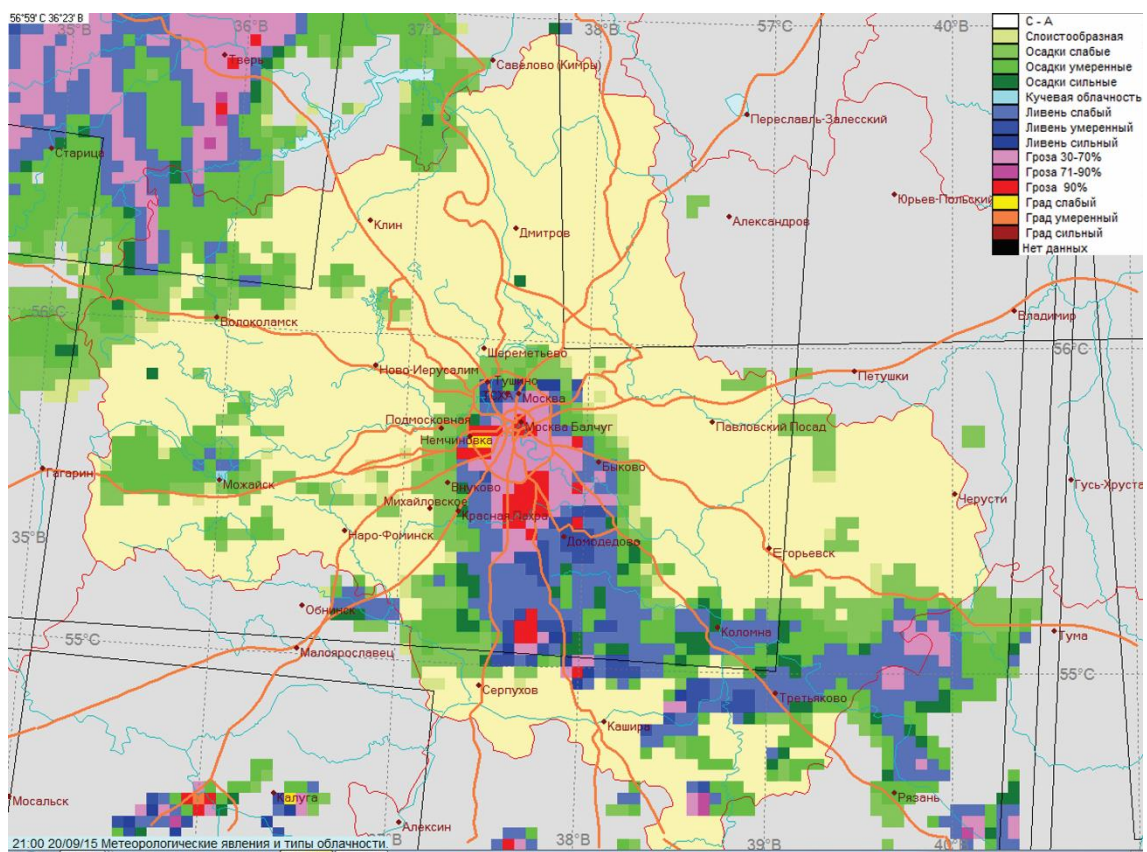
Рис.37. Фактические данные о радиолокационной отражаемости 8 ноября 2015 г. 15 ч ВСВ (а) и прогноз с заблаговременностью 2 ч, выполненный по стыкованным данным МРЛ за 8 ноября 2015 г. 13 ч ВСВ и информации модели WRF-ARW за 8 ноября 2015 г. 6 ч, с заблаговременностью 7 ч. (б).

Сравнение этих рисунков показывает, что прогностическая карта (Рис. 37 б) выглядит полнее за счет присутствия информации модели WRF-ARW. Здесь отчетливо видна фронтальная зона, протянувшаяся от Балтийского моря до границы Украины с Молдавией. Правильно спрогнозированы осадки в г. Смоленске, Петрозаводске, Казани, Оренбурге. Но, главное,

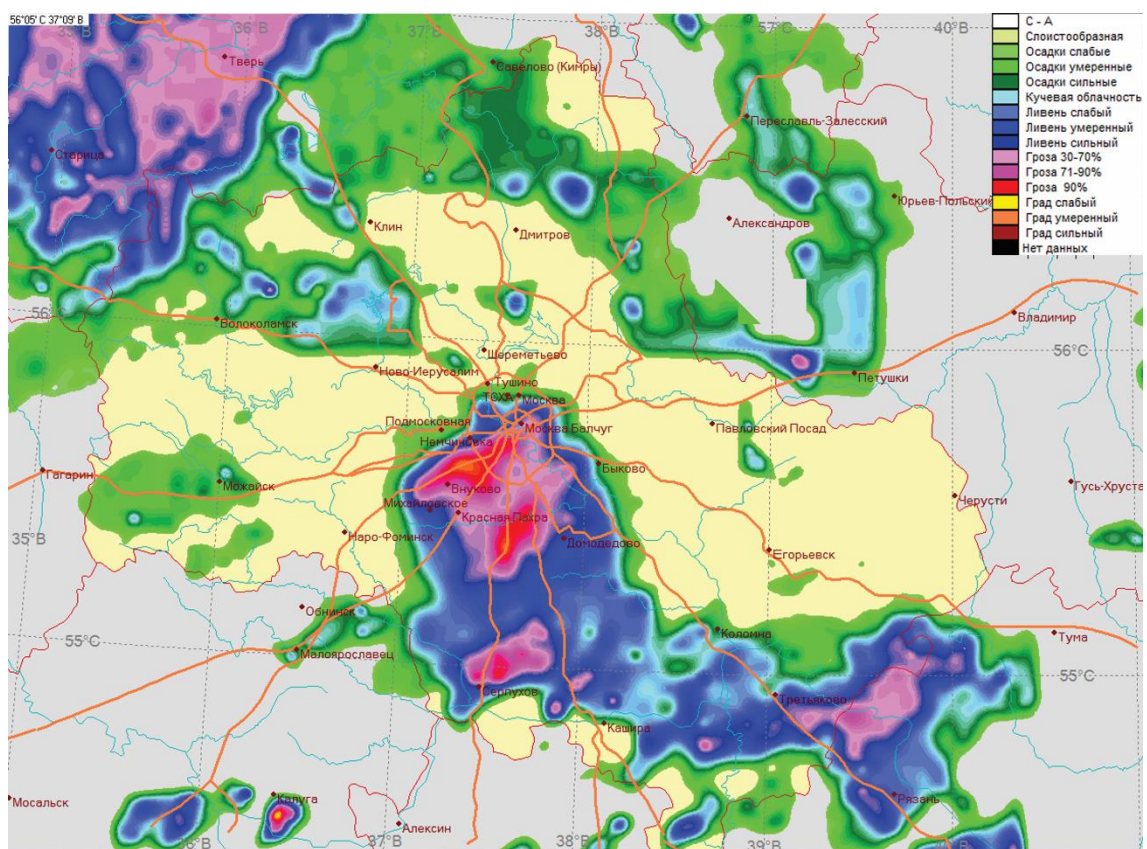
использование дополнительных прогностических данных о радиолокационной отражаемости модели WRF-ARW позволило правильно спрогнозировать осадки в Прибалтике и ливневые осадки в окрестностях Киева, в местах, где на момент начала прогноза отсутствовали радиолокационные наблюдения.

Среди информации, передающейся от метеорологических радиолокаторов, кроме радиолокационной отражаемости на разных уровнях, есть данные о явлениях погоды (осадки, ливни, грозы, шквалы, град), рассчитанные по комплексным критериям распознавания [28]. Способ перевода значений радиолокационной отражаемости в различные явления погоды представлен в [22].

Таким образом, появляется возможность сверхкраткосрочного (в пределах 0 - 6 ч с шагом 10 минут) прогноза по данным модельной радиолокационной отражаемости таких явлений погоды, как осадки, ливни, грозы, шквалы, град. На Рис.38 (б) представлен наукастинг, выполненный с заблаговременностью 2 ч с использованием данных от метеорологических радиолокаторов за 20 сентября 2015 г. 19 ч ВСВ и информации модели WRF-ARW за 20 сентября 2015 г. 12 ч ВСВ. Данные о явлениях погоды от метеорологических радиолокаторов используются напрямую из телеграмм BUFR. Явления погоды по данным модели WRF-ARW рассчитываются, согласно [22], с использованием комплексных критериев распознавания. Для сравнения, на Рис. 38 (а) представлены фактические данные МРЛ за 20 сентября 2015 г. 21 ч ВСВ. Прогнозы гроз в Москве, Внуково, Домодедово, а также в Твери были подтверждены данными наблюдений на метеостанциях, также как ливневые осадки в г. Петушки. По данным МРЛ (Рис. 38 а) осадков в г. Петушки нет, однако по данным наблюдений на метеостанции г. Петушки 20 сентября зафиксированы ливневые осадки в 21 ч ВСВ. Причину отсутствия в этом районе информации по данным радиолокационных наблюдений можно объяснить ослаблением сигнала в осадках или присутствием зоны экранирующих осадков [28]. Правильный прогноз по отсутствию осадков в указанный срок в г. Дмитрове, Александрове, Павловом Посаде, Клину, на метеостанциях Шереметьево, Тушино (Рис. 38 б) подтвержден информацией с метеостанций. К сожалению, невозможно проверить были или нет осадки на севере Московской области, между г. Дмитровым и г. Савелово, ввиду отсутствия там метеонаблюдений.



а)



б)

Рис.38. Явления погоды по данным МРЛ 20 сентября 2015 г. 21 ч ВСВ (а) и наукастинг с заблаговременностью 2 ч по стыкованным данным МРЛ и WRF-ARW (б).

Для проверки эффективности наукастинга была проведена оценка прогноза факта осадков по наблюдениям на метеорологических станциях. Для этого использовались архивные данные о погоде в срок наблюдения, передающиеся с метеорологических станций европейской территории России и сопредельных стран, данные метеорологических радиолокаторов, поступающие в коде BUFR, а также прогностические поля ветра и значения радиолокационной отражаемости, рассчитанные по подели WRF-ARW с 1 по 30 сентября 2015 г. Прогнозы зон осадков с заблаговременностью 2 ч проверялись по данным наблюдений за срок 12 ч BCB. Использовались прогностические данные модели WRF-ARW за 6 ч BCB с заблаговременностью 4 ч.

В статье диссертанта [37] приведены результаты авторской оценки качества, разработанного наукастинга, построенного по данным метеорологических радиолокаторов и прогностических полей ветра. При оценке сопоставлялись рассчитанные поля радиолокационной отражаемости с заблаговременностью 1 - 3 ч с фактическими данными метеорологических радиолокаторов. Критерий Пирси - Обухова составил соответственно для заблаговременностей 1, 2 и 3 часа: 0,76, 0,61 и 0,42. В методе, представленном в данной главе, начальное поле радиолокационной отражаемости включает в себя помимо данных МРЛ, данные о виртуальной радиолокационной отражаемости, присутствующей в неосвещенных радиолокаторами местах. Оценка успешности прогноза факта осадков предлагаемого метода проводилась в соответствии с Наставлением [27], путем сравнения с данными наблюдений на станциях. Прогностические данные, расположенные в узлах регулярной сетки с шагом 4x4 км, с помощью билинейной интерполяции приводились к координатам станций наблюдений и сравнивались с данными о погоде в срок наблюдения. Прогноз считался оправдавшимся, если в соответствующем пункте прогнозировались осадки и в фактических данных присутствовали осадки (в любом виде) в срок наблюдения и наоборот, если прогнозировалась погода без осадков и на станциях не было зафиксировано осадков в срок наблюдения. Результаты испытаний представлены в Табл 11 – 13, где представлена матрица сопряженности для прогноза осадков по данным МРЛ с заблаговременностью 2 ч без учета прогностических данных о радиолокационной отражаемости по WRF-ARW, в Табл. 12 - с учетом данных о радиолокационной отражаемости по WRF-ARW. Для сравнения, в Табл. 12 представлены матрица сопряженности осадков по данным наблюдений за срок 12 ч BCB и данным МРЛ за срок 12 ч BCB. Анализ результатов показывает, что характеристики успешности прогноза осадков в Табл. 10 и Табл. 12 - довольно близки, что говорит о том, что применение данных WRF-ARW не ухудшает прогноз, однако более полная картина дает дополнительную информацию дежурному синоптику для оценки синоптического положения. Отличие в значениях общего числа выборки для Табл. 11 и Табл.

12 объясняется в значительно большем покрытии исследуемой территории прогностическими данными в случае применения данных WRF-ARW совместно с данными метеорологических радиолокаторов.

Таблица 12. Таблица сопряженности осадков по данным наблюдений за 12 ч ВСВ с прогнозом факта осадков с заблаговременностью 2 ч по данным МРЛ и прогностических полей ветра модели WRF-ARW за 10 ч. 1 - 30 сентября 2015 г.

Прогноз	Наблюдения		Сумма	U	$U + \Pi$
	Осадки	Без осадков			
Осадки	1098	249	1347	0.82	1.41
Без осадков	759	4482	5241	0.86	1.80
Сумма	1857	4731	6588		
Π	0.59	0.95			
T	0.54				
H	0.59				

где U - оправдываемость, Π - предупрежденность, T - критерий качества прогноза Пирси - Обухова, H - критерий надежности Багрова - Хайдке [27].

Таблица 13. Таблица сопряженности осадков по данным наблюдений за 12 ч ВСВ с прогнозом факта осадков с заблаговременностью 2 ч по данным МРЛ, прогностической радиолокационной отражаемостью и полей ветра модели WRF-ARW за 10 ч. 1 - 30 сентября 2015 г.

Прогноз	Наблюдения		Сумма	U	$U + \Pi$
	Осадки	Без осадков			
Осадки	4493	1411	5904	0.76	1.39
Без осадков	2652	13518	16170	0.84	1.74
Сумма	7145	14929	22074		
Π	0.62	0.84			
T	0.53				
H	0.56				

Таблица 14. Таблица сопряженности для оценки факта осадков по данным наблюдений с данными МРЛ о факте осадкаов за срок 12 ч. За период 1 - 30 сентября 2015 г.

Прогноз	Наблюдения		Сумма	U	$U + \Pi$
	Осадки	Без осадков			
Осадки	1288	164	1452	0.89	1.55
Без осадков	642	4590	5232	0.89	1.84
Сумма	1930	4754	6684		
Π	0.67	0.97			
T	0.63				
H	0.68				

Совместный анализ результатов, представленных в Табл. 12 – 14, показывает, что несколько худшее качество успешности прогнозов осадков (Табл. 12 и Табл. 13) по сравнению с Табл. 14 может быть объяснено временем жизни конвективных процессов (которое иногда не превышает получаса), однако, основные показатели - критерий качества Пирси - Обухова, критерий надежности Багрова, суммарный показатель оправдываемости и предупрежденности осадков, характеризуют удовлетворительное качество прогнозов.

На Рис. 39 представлена объединенная карта данных МРЛ и модели WRF-ARW за 20 сентября 2016 г. 20 ч ВСВ. На этом же рисунке представлена таблица детального прогноза явлений погоды с 20 ч на ближайшие 3 ч с шагом 10 минут. Список пунктов наблюдений, по которым составляется прогноз - произвольный и может редактироваться оператором.

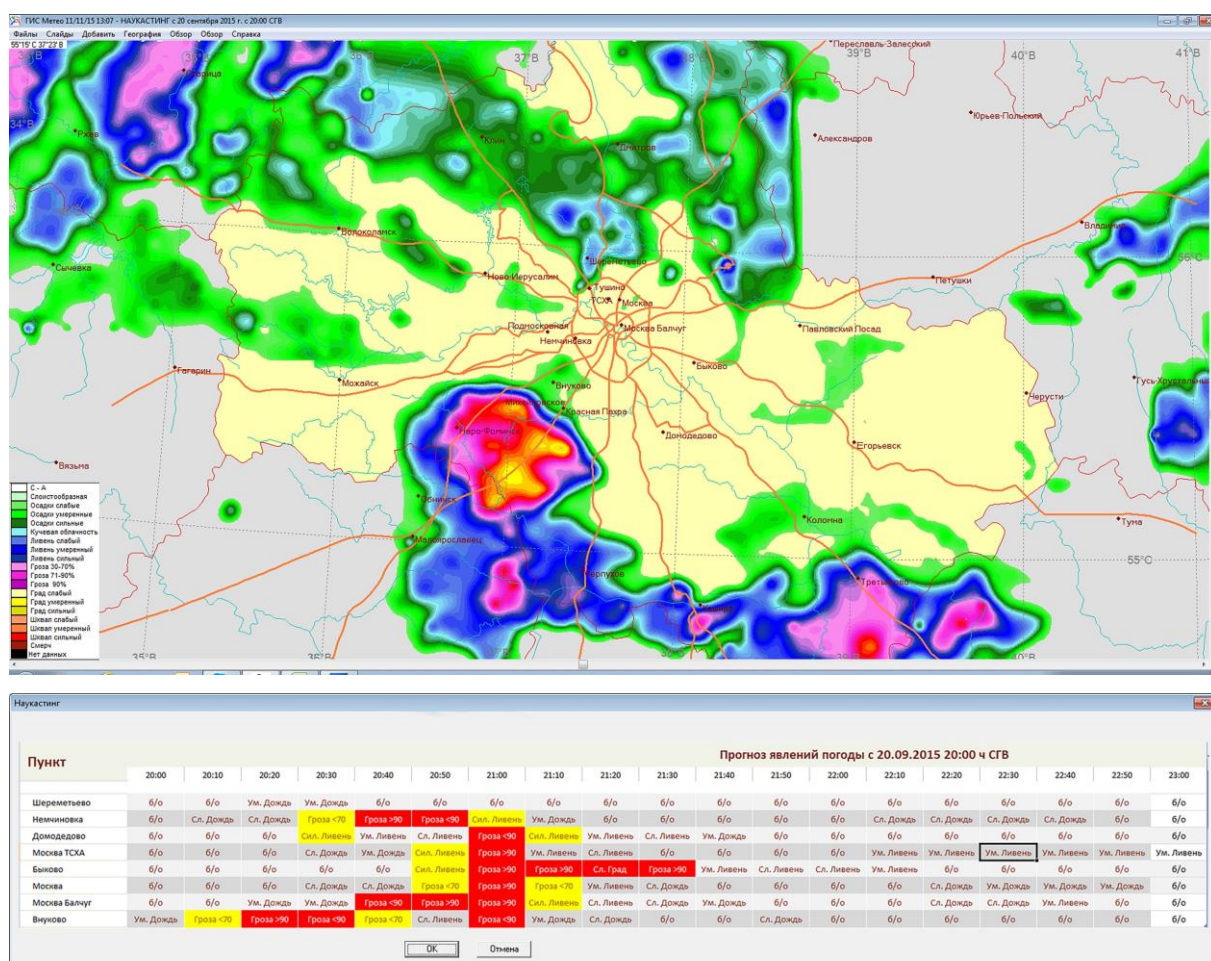


Рис. 39. Пример наукастинга конвективных явлений по данным МРЛ и модели WRF-ARW 20.09.2015 с 20:00 СГВ.

Технология блендинга (смешивания данных наблюдений и результатов расчета гидродинамической модели) была применена диссертантом в технологии АРМ Синоптика при метеорологическом обеспечении XXII Олимпийских игр в 2014 г. Было создано программное средство, позволяющее выводить на экран данные автоматических метеорологических

станций (АМС) – температуру воздуха, скорость ветра и порывы ветра, относительную влажность, атмосферное давление и на этом же графике изображать прогностические кривые (пунктир) тех же параметров (Рис.40). Синоптику, анализирующему графики, не составляло труда спрогнозировать характеристики погоды (температуру, ветер, влажность), учитывая ошибку модели в срок наблюдения и тренды, определяемые по предыдущим данным наблюдений и по прогностическим данным.

$$V_{c+p} = O_c + S_p(O_{c+p} - O_c) + R_p(m_{c+p} - m_c), \quad (52)$$

где V_{c+p} – прогнозируемый параметр с заблаговременностью p , O_c – данные наблюдений в момент времени c , O_{c+p} – прогноз, определенный по экстраполяции данных наблюдений, m_{c+p} – прогноз по данным гидродинамической модели на момент времени $c + p$, m_c – прогноз по данным гидродинамической модели в момент времени c , S_p и R_p – весовые множители.

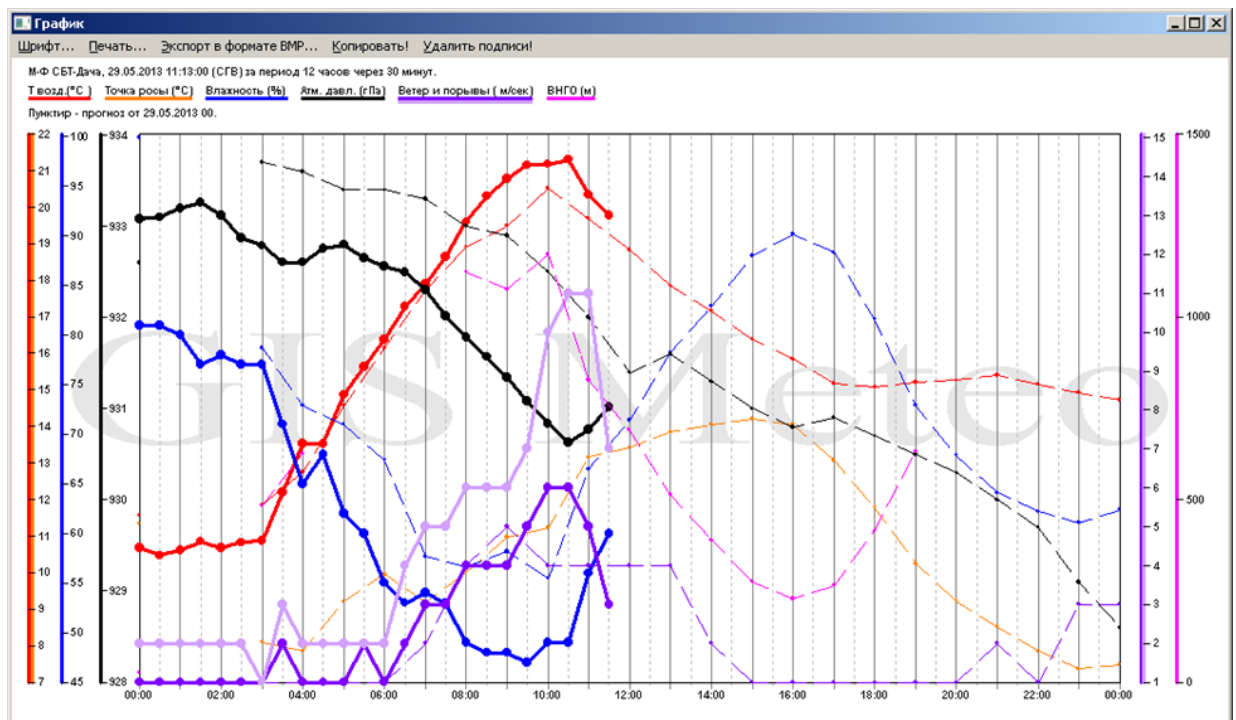


Рис.40. Графики данных наблюдений (сплошные линии) и прогностические значения тех же параметров (пунктирные линии) по станции СВТ-Дача за 29.05.2013 г. с 11:13 ВСУ за период 12 ч. Сплошные линии: красная – температура воздуха, синяя – относительная влажность, черная – давление, фиолетовая – ветер и порывы ветра. Пунктирные линии тех же цветов – соответствующие метеорологические параметры по прогнозам модели WRF-ARW.

Метод прогноза будущего положения зоны активной конвекции с помощью экстраполяции или по траекторным расчетам давно известен и применяется во многих метеослужбах разных стран. Однако он имеет один существенный недостаток: среднее время жизни конвективного процесса – 30 минут. Поэтому, экстраполяционные прогнозы с заблаговременностью более часа содержат довольно существенные ошибки. Необходим учет эволюции конвективных процессов. Проводился блендинг с прогнозами по WRF-ARW. Смешивание с разными весами прогнозов, полученных по перемещению данных в срок наблюдения с результатами расчета модели позволяет учесть эволюцию конвективных процессов.

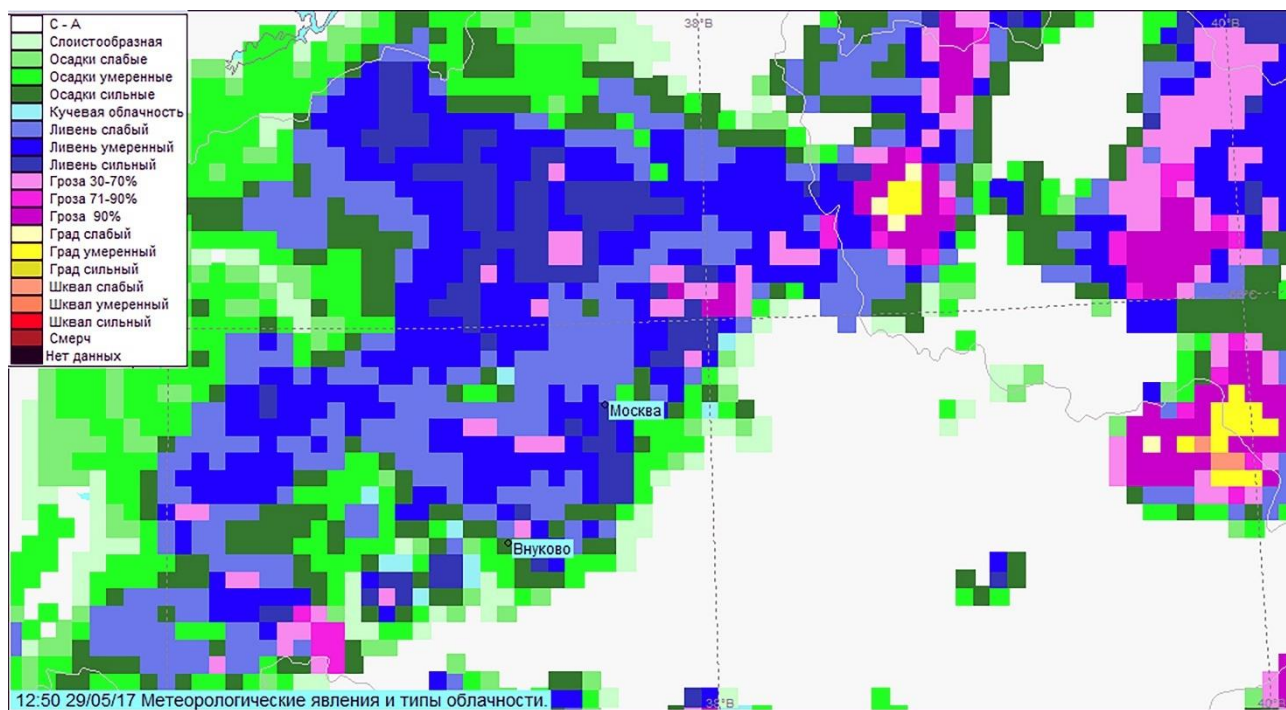
$$V(x, y)_{c+p} = w O_{c+p}(x, y) + (1 - w) M_{c+p}(x, y), \quad (53)$$

где w - весовой множитель, O_{c+p} – значение в срок наблюдения, перемещенное по траекторной модели, M_{c+p} – прогноз по гидродинамической модели (Рис.41 б). Для сравнения, на Рис. 41 а) представлена информация от метеорологического радиолокатора на срок прогноза. Сравнение показывает, хорошее совпадение полей, полученных по информации радиолокатора и прогностических явлений погоды, с заблаговременностью 2 ч.

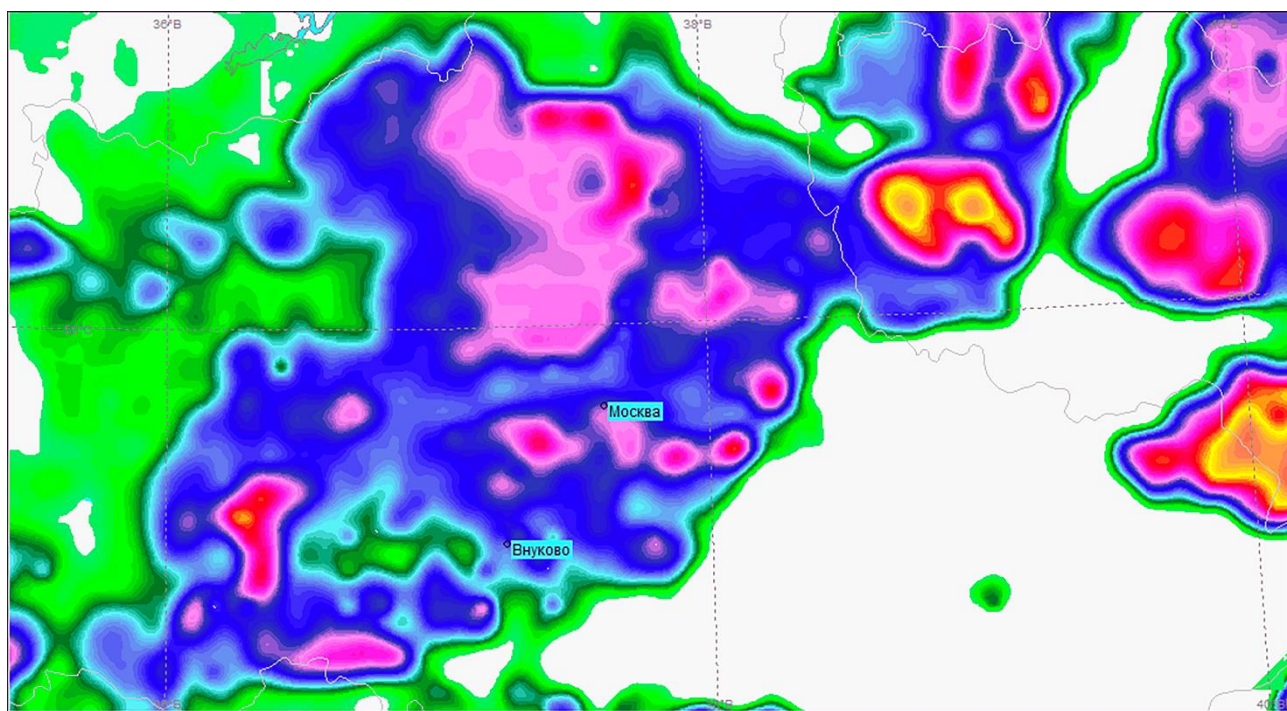
На Рис.42 представлена структурная схема комплексной системы наукастинга в технологии АРМ Синоптика. В центр сбора данных поступает информация от системы грозопеленгации, АМС, метеорологических радиолокаторов, геостационарных спутников и других наблюдений. Данные наблюдений усваиваются с помощью модуля WRFDA-3DVAR при расчете мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW. Этот модуль входит в поставку WRF-ARW. Гидродинамическая модель начинает расчет ежечасно, используя горячий старт, результаты прогнозов выдаются с шагом 10 минут с общей заблаговременностью до 6 часов.

Каждые 10 минут включаются в работу два блока (постпроцессинг), отвечающие соответственно за прогноз конвективных явлений и прогноз таких параметров, относительная влажность, ветер и температура.

Оператор, работающий с системой наукастинга, может быстро определить возможное ухудшение погоды по окраске в шкале соответствующего параметра. Желтый и красный цвета сигнализируют о достижении пороговых значений погодных характеристик. Разработанная технология предусматривает быструю настройку на проведение расчетов наукастинга в любой географической точке Земного шара.



а)



б)

Рис. 41. Явления погоды по данным МРЛ (а) за 29 мая 2017 12:50 ВСВ и наукастинг, выполненный по технологии блендинга данных наблюдений МРЛ и прогностических данных, рассчитанных по модели WRF-ARW за этот же срок с заблаговременностью 2 ч.

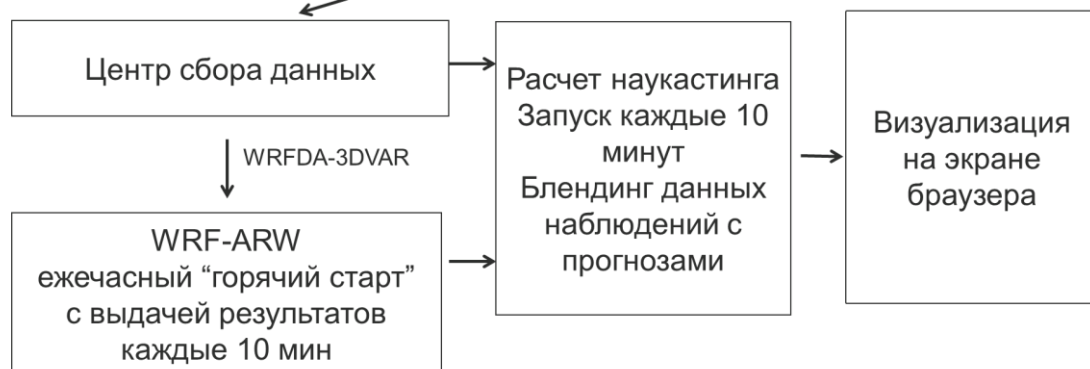


Рис.42. Структурная схема системы наукастинга

В центр сбора данных (ЦСД) регулярно поступает информация от автоматических метеорологических станций (АМС), синоптических и аэрологических станций, метеорологических радиолокаторов (МРЛ), геостационарных спутников, сети грозопеленгации. Далее, эта информация используется для усвоения по технологии WRFDA-3DVAR [24].

Выводы

1. Впервые, с помощью расчетов по выходной информации модели WRF-ARW воспроизведены горизонтально ориентированные диполи аномалий потенциального вихря в средней тропосфере вокруг конвективного восходящего потока, что позволяет отследить эволюцию отдельной грозовой ячейки и повысить качество прогноза опасных и неблагоприятных явлений, связанных с глубокой влажной конвекцией.
2. Расчет и визуализация мезомасштабного потенциального вихря в оперативном режиме работы способно оказать помощь дежурному синоптику в определении бароклинических зон и зон активной конвекции.
3. Предложенная для определения конвективных явлений функция ψ позволяет локализовать место наибольших порывов ветра при глубокой влажной конвекции. Проверка успешности прогноза конвекции поля ψ и данных наблюдений по метеорологическим радиолокаторам показало следующие результаты: критерий Багрова-Хайдке 0,63, коэффициент ложных тревог 0,25.
4. Разработана технология наукастинга, позволяющая рассчитывать сверхкраткосрочный прогноз явлений погоды, используя технологию блендинга данных наблюдений метеорологических радиолокаторов и результатов прогноза зон опасных явлений, рассчитанных по выходной информации мезомасштабной модели WRF-ARW. Результаты

проведения оценки успешности прогнозов факта осадков с заблаговременностью 2 ч.: критерий Пирси - Обухова 0,62, критерий Багрова-Хайдке 0,56.

5. Технология блендинга, примененная к прогнозу таких важных параметров как метеорологическая дальность видимости, высота нижней границы облачности, приземная температура, позволяет свести к минимуму ошибки прогноза в пределах ближайших 6 час, вызванные несовершенством гидродинамических моделей.
6. Разработанная технология позволяет произвести быструю настройку на новые виды данных наблюдений, которые в настоящий не используются для расчета наукастинга. (профилемеры, лидары, содары и т. п.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена разработанная автором технология, позволяющая оперативно создавать карты изэнтропического анализа, рассчитывать на изэнтропических поверхностях значения таких параметров, как потенциальный, эквивалентно-потенциальный и влажно-потенциальный вихри. Приведено описание построения трехмерных изэнтропических траекторий. На примере конкретного случая – неожиданно сильного снегопада, прошедшего в Московском регионе 7 декабря 2009 г. - продемонстрировано применение разработанной технологии для исследования условий возникновения атмосферных явлений и для прогноза погоды. Технология не заменяет традиционный (изобарический) способ исследования явлений погоды, но может существенно дополнить его, позволяя по-другому посмотреть на процессы, происходящие в атмосфере и в итоге помочь синоптику в составлении более точного прогноза. Научное метеорологическое сообщество в настоящее время обсуждает не факт необходимости изэнтропического анализа, а возможность сделать этот способ исследования атмосферных процессов удобным для использования в оперативной работе синоптиков, а в исследовательской работе - для лучшего понимания процессов, происходящих в атмосфере.
2. Разработан и испытан метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодное время года с использованием таких крупномасштабных предикторов, как дивергенция Q -вектора, эквивалентно-потенциальный вихрь в состоянии насыщения и относительная влажность воздуха в нижней тропосфере. Сравнение результатов оценки разработанного метода, по выходным данным гидродинамической модели UKMO, показало значительное улучшение по сравнению с прогнозами осадков модели UKMO, как по критерию качества прогноза Пирси-Обухова (0.72 против 0.33), так и по показателю оправдываемости штормовых предупреждений (0.48 против 0.29).
3. Разработан и испытан метод прогноза шквалов с использованием вертикальной компоненты крупномасштабного потенциального вихря Эртеля в средней тропосфере и расчетом бароклинических зон в нижней тропосфере. Вычисленные по достаточно объемной выборке оценки успешности прогноза разработанным методом, дают возможность сделать вывод, что метод имеет практическую значимость: критерий Пирси - Обухова 0,68, коэффициент ложных тревог 1,0. Метод может быть реализован на выходной продукции любой гидродинамической модели, при условии представления выходной продукции в форматах ГРИБ или ГРИБ2. Метод основан на определении зон активной конвекции, поэтому применим к прогнозированию и других опасных и неблагоприятных

явлений погоды, связанных с глубокой, влажной конвекцией (сильных ливневых осадков, града, грозы).

4. Впервые в результате исследования мезомасштабной структуры потенциального вихря тропосфере в условиях глубокой влажной конвекции воспроизведены горизонтально ориентированные диполи аномалий потенциального вихря в средней тропосфере вокруг конвективного восходящего потока на основе расчетов по выходной продукции мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW. Проведенные в диссертации исследования показали, что мониторинг диполей потенциального вихря в тропосфере позволяет отследить эволюцию отдельной грозовой ячейки, что при использовании в оперативном прогнозе способно оказать помощь дежурному синоптику в определении бароклинических зон и зон активной конвекции.
4. Разработана технология наукастинга, позволяющая производить сверхкраткосрочный прогноз явлений погоды, используя технологию блендинга данных наблюдений метеорологических радиолокаторов и результатов расчета зон опасных явлений по выходной информации мезомасштабной модели WRF-ARW. Оценка успешности прогнозов осадку по факту составила: критерий Пирси - Обухова 0.62, критерий Багрова – Хайдке 0,56.

Список литературы

1. Акулиничева А. А., Беркович Л. В., Соломахов А. Ю., Шмелькин Ю. Л., Юсупов Ю. И. Геоинформационная система “Метео” и состояние ее использования в метеослужбах России и ближнего зарубежья. // Метеорология и гидрология. – 2001.–№.11. – С. 90 – 98.
2. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее приложения. - Москва: Мир, 1972. - 316 с.
3. Алдухов О.А., Быков Ф.Л., Гордин В.А. Крупномасштабные трехмерные корреляционные функции для атмосферы Земли. Ярославский педагогический вестник. 2011;3(4).
4. Алексеева А. А. Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов// Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов - Информационный сборник №34. – 2007. – С. 49 – 69.
5. Алексеева АА. Метод прогноза сильных шквалов //Метеорология и гидрология. – №9. – 2014. – С. 5-15.
6. Алексеева А. А. Особенности условий возникновения активной конвекции с сильными шквалами // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. №2. – 2019. – С. 41-58.
7. Багров А. Н., Быков Ф. Л., Гордин В. А. Схема оперативного краткосрочного комплексного прогноза ветра. // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 7. – С. 19-28.
8. Багров А. Н. Результаты оперативных испытаний мезомасштабной модели COSMO-Ru13. // Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов - Информационный сборник №47. – 2020. – С. 3 – 21.
9. Бедрицкий А. И., Вильфанд Р. М., Киктев Д. Б., Ривин Г. С. Суперкомпьютерные технологии численного прогноза погоды в Росгидромете. //Метеорология и гидрология. – 2017. – № 7. – С. 10-23.
10. Белоусов С. Л., Юсупов Ю. И. Расчет трехмерных траекторий воздушных частиц //Метеорология и гидрология. – 1991. – №. 12. – С. 41-48.
11. Борисова В. В., Шакина Н. П. Использование потенциального вихря для расчета высоты и температуры тропопаузы // Тр. ГМЦ СССР. – 1989. – Вып. 305. – С. 98 – 117.
12. Быков, Ф. Л., Гордин, В. А. О статистической связи атмосферных фронтов и осадков. //Тр. ГМЦ РФ. – 2012. – Вып. 348. – С. 184-194.
13. Быков Ф. Л, Гордин В.А. Объективный анализ трехмерной структуры атмосферных фронтов. //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Вып. 48(2). – С. 172-188.
14. Васильев Е. В., Алексеева А. А., Песков Б. Е. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов// Метеорология и гидрология. – 2009. – №.1. – С. 5 – 15.

15. Вильфанд Р. М., Ривин Г. С., Розинкина И. А. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития. //Метеорология и гидрология. – 2010. – №.8. – С. 5 - 20.
16. Губенко И.М. Исследование физических процессов в конвективных облаках во время гроз на основе численного моделирования. Диссертация кандидата физико-математических наук. Научный рук. Рубинштейн К. Г. – 2016. Гидрометцентр РФ, Москва. – 130 с
17. Калинин Е. Д., Юсупов Ю. И. Метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодный период года. // Метеорология и гидрология. – 2013. – №. 4.– С. 19 - 28.
18. Киктев Д. Б., Муравьев А. В., Смирнов А. В. Наукастинг метеорологических параметров и опасных явлений: опыт реализации и перспективы развития. //Гидрометеорологические исследования и прогнозы. –2019. –№ 4. –С. 92-111.
19. Курганский М. В. Введение в крупномасштабную динамику атмосферы. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1993 г., – 168 с.
20. Переходцева Э. В. Прогноз сильных шквалов и смерчей в летний период 2009 года на основе статистических моделей. //Труды ГМЦ РФ. – 2010. – Вып. 344. – С. 241 – 253.
21. Песков Б. Е., Снитковский А. И. К прогнозу сильных шквалов. // Метеорология и гидрология. – 1968. – № 7.– С. 52 - 57.
22. Ривин Г. С., Вильфанд Р. М., Киктев Д. Б., Розинкина И. А., Тудрий К. О., Блинов Д. В., Варенцов М. И., Самсонов Т. Е., Бундель А. Ю., Кирсанов А. А., Захарченко Д. И. Система численного прогнозирования явлений погоды, включая опасные, для Московского мегаполиса: разработка прототипа. // Метеорология и гидрология. –2019. –№ 11. – С. 33-45.
23. Ривин Г. С., Розинкина И. А., Вильфанд Р. М., Киктев Д. Б., Тудрий К. О., Блинов Д. В., Варенцов М. И., Захарченко Д. И., Самсонов Т. Е., Репина И. А., Артамонов А. Ю. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и условий возникновения опасных явлений с высокой детализацией для Московского мегаполиса. // Метеорология и гидрология. –2020. – № 7. – С. 5-19.
24. Рубинштейн К. Г., Губенко И. М., Игнатов Р. Ю., Тихоненко Н. Д., Юсупов Ю. И. Эксперименты по усвоению данных сети гронопеленгации //Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32. – №. 11. – С. 936-941.
25. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1986, с. 527 – 536.
26. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. – Л.: Гидрометеиздат, 1985, с. 134, 152 – 161.
27. Руководящий документ. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и

- гелиогеофизических прогнозов. РД 52.27.284 – 91. Комитет гидрометеорологии при кабинете министров СССР. – М.: 1991. – С. 31 – 40.
28. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. 1993, – Гидрометеиздат, Санкт-Петербург, 358 с.
29. Шакина Н. П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 263 с.
30. Шакина Н. П. Лекции по динамической метеорологии. – М.: ТРИАДА ЛТД. 2013. – 160 с.
31. Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н. Диагноз и прогноз распределения вероятности осадков разной интенсивности. //Метеорология и гидрология, – 2011. – №. 8.– С. 5 - 21.
32. 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.
33. Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н., Иванова А. Р., Хоменко И. А. Сильные осадки средиземноморских циклонов над Россией и Украиной. / В кн.: Фундаментальные и прикладные гидрометеорологические исследования. Под ред. Р. М. Вильфанда. – СПб, Гидрометеиздат, 2003, с. 36 - 41.
34. Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2017 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М. В. Ломоносова. /под ред. М. А. Локощенко. – Москва: МАКС Пресс, 2018, с. 99-115.
35. Юсупов Ю. И. Использование изэнтропического анализа в оперативном краткосрочном прогнозе погоды. //Метеорология и гидрология, – 2012. – №.1.– С.42 - 49.
36. Юсупов Ю. И. Метод прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля. //Метеорология и гидрология. – 2013, – №.11. – С.55 - 63.
37. Юсупов Ю. И. Комплексная система наукастинга для авиации в технологии ГИС Метео. //Метеоспектр. – 2016. №4. – 72 – 81.
38. Юсупов Ю. И. Исследование структуры тропосферного потенциального вихря в масштабе мезо-γ при глубокой влажной конвекции с помощью модели WRF-ARW // Процессы в гео-средах. – 2020. – №. 4 (26). – С. 983 - 988.
39. Юсупов Ю. И. Влияние погодных условий на воздействие на воздушное судно спутного следа при полете на крейсерском режиме. // Метеоспектр. – 2020. №4. – С. 10 - 13.
40. Bluestein, H.B. Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes: Volume 1, principles of kinematics and dynamics, –1992.
41. Bolton D. The computation of equivalent potential temperature //Monthly weather review. – 1980. – Vol. 108. – №. 7. – P. 1046-1053.

42. Braun S. A., Houze Jr R. A. The heat budget of a midlatitude squall line and implications for potential vorticity production //Journal of Atmospheric Sciences. – 1996. – Vol. 53. – №. 9. – P. 1217-1240.
43. Browning K. A. et al. The convective storm initiation project //Bulletin of the American Meteorological Society. – 2007. – Vol. 88. – №. 12. – P. 1939-1956
44. Chagnon J. M., Gray S. L. Horizontal potential vorticity dipoles on the convective storm scale //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography. – 2009. – Vol. 135. – №. 643. – P. 1392-1408.
45. Doswell C. A., Bosart L. F. Extratropical synoptic-scale processes and severe convection //Severe Convective Storms. – American Meteorological Society, Boston, MA, 2001. – P. 27-69.
46. Emanuel K. A. On assessing local conditional symmetric instability from atmospheric soundings //Monthly weather review. – 1983. – Vol. 111. – №. 10. – P. 2016-2033
47. Georgiev C. G. Quantitative relationship between Meteosat WV data and positive potential vorticity anomalies: a case study over the Mediterranean //Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling. – 1999. – Vol. 6. – №. 2. – P. 97-109.
48. Groenemeijer P. H., Van Delden A. Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands //Atmospheric research. – 2007. – Vol. 83. – №. 2-4. – P. 473-487.
49. Halkomb C. and Market P. Forcing, instability and equivalent potential vorticity in a Midwest USA convective snowstorm. Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling.– 2003.– №10.– P. 273 – 280.
50. Hertenstein R. F. A., Schubert W. H. Potential vorticity anomalies associated with squall lines //Monthly weather review. – 1991. – Vol. 119. – №. 7. – P. 1663-1672.
51. Hewson T. D. Objective fronts //Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling. – 1998. – Vol. 5. – №. 1. – P. 37-65.
52. Holton J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth edition. – Elsevier Academic Press, 2004.
53. Hoskins B. J., Draghici I., Davies H. C. A new look at the ω -equation //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1978. – Vol. 104. – №. 439. – P. 31-38.
54. Hoskins B. J., McIntyre M. E., Robertson A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1985. – Vol. 111. – №. 470. – P. 877-946.
55. Huber-Pock F., Kress C. An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products //Meteorology and Atmospheric Physics. – 1989. – Vol. 40. – №. 4. – P. 170-180.

56. Hwang Y. et al. Improved nowcasts by blending extrapolation and model forecasts //Weather and Forecasting. – 2015. – Vol. 30. – №. 5. – P. 1201-1217.
57. Johns R. H., Doswell III C. A. Severe local storms forecasting //Weather and Forecasting. – 1992. – Vol. 7. – №. 4. – P. 588-612.
58. Johnson R. H., Ciesielski P. E. Potential vorticity generation by west African squall lines //Monthly Weather Review. – 2020. – Vol. 148. – №. 4. – P. 1691-1715.
59. Mansfield D. A. The use of potential vorticity as an operational forecast tool //Meteorological Applications. – 1996. – Vol. 3. – №. 3. – P. 195-210.
60. Markowski P., Richardson Y. Mesoscale meteorology in midlatitudes. – John Wiley & Sons, 2011.
61. Müller A., Niedrich B., N  vir P. Three-dimensional potential vorticity structures for extreme precipitation events on the convective scale //Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. – 2020. – Vol. 72. – №. 1. – P. 1-20.
62. Pauluis O. M., Mrowiec A. A. Isentropic analysis of convective motions //Journal of the atmospheric sciences. – 2013. – Vol. 70. – №. 11. – P. 3673-3688.
63. Raymond D. J., Jiang H. A theory for long-lived mesoscale convective systems //Journal of Atmospheric Sciences. – 1990. – Vol. 47. – №. 24. – P. 3067-3077.
64. Renard R.J. & Clarke I.C., Experiments in numerical objective frontal analysis. //Mon. Wea. Rev. –1965. –Vol. 93. –P. 547-556.
65. Reuter G. W., Aktary N. Convective and symmetric instabilities and their effect on precipitation: Variation in Central Alberta during 1990 and 1991. //Mont. Wea. Rev. –1995. –Vol. 16. –P. 153 - 161.
66. Rotunno R., Klemp J. B., Weisman M. L. A theory for strong, long-lived squall lines //Journal of Atmospheric Sciences. – 1988. – Vol. 45. – №. 3. – P. 463-485.
67. Russell A., Vaughan G. and Norton E. G. Large-scale potential vorticity anomalies and deep convection. //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. –2012. –Vol. 138. –P. 1627 - 1639.
68. Seefeldt M. W., Tice M., Cassano J. J., and Shupe M. D. Evaluation of WRF Radiation and Microphysics Parameterizations for use in the Polar Regions. – Atmospheric Model Parameterizations in the Polar Regions Workshop. –2012. –P.127-135.
69. Uccellini L. W. Isentropic analysis for meteorological applications //Proceedings of the 1st Conference on Isentropic Analysis and Forecasting. – 1995.
70. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 4.1 Updated: April 12, 2019. https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.1/contents.html

71. Weijenborg C. et al. Coherent evolution of potential vorticity anomalies associated with deep moist convection //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2017. – Vol. 143. – №. 704. – P. 1254-1267.
72. Weisman M. L., Rotunno R. “A theory for strong long-lived squall lines” revisited //Journal of the Atmospheric Sciences. – 2004. – Vol. 61. – №. 4. – P. 361-382.
73. Wetzel A. N. et al. Potential vorticity and balanced and unbalanced moisture //Journal of the Atmospheric Sciences. – 2020. – Vol. 77. – №. 6. – P. 1913-1931.
74. Wetzel S. W., Martin J. E. An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation //Weather and Forecasting. – 2001. – Vol. 16. – №. 1. – P. 156-167.
75. Wiesmueller J. L., Zubrick S. M. Evaluation and application of conditional symmetric instability, equivalent potential vorticity, and frontogenetic forcing in an operational forecast environment //Weather and forecasting. – 1998. – Vol. 13. – №. 1. – P. 84-101.
76. Wilson J. W. Precipitation nowcasting: past, present and future. //Sixth International Symposium on Hydrological Application of Weather Radar. Melbourne, Australia. –2004. –P. 2-4.



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
(МГУ)**

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Ленинские горы, д.1, Москва, ГСП-1, 119991
Телефон: (495) 939-22-38, Факс: (495) 932-88-36
e-mail: secretary@geogr.msu.ru

О внедрении в учебный процесс

Н.В. Добролюбов № *108-Г-33/249*
На № _____

Справка

**о внедрении компонент ГИС Метео в учебный процесс географического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова**

Настоящая справка подтверждает, что разработанные Ю.И. Юсуповым компоненты ГИС Метео: Изэнтропический анализ, Изэнтропические траектории, Фронты, Прогноз шквалов, Потенциальный вихрь, успешно внедрены в 2017 г. сотрудниками кафедры метеорологии и климатологии в учебный процесс географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в 2017 г. и используются по настоящее время для синоптического анализа текущей и прогностической ситуации, изучения студентами физических процессов образования опасных явлений погоды.

Декан географического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
член-корр. РАН



С.А. Добролюбов



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ИГУ»)
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ул. К.Маркса, д.1, г. Иркутск, 664003
Тел.: (3952) 521-089 Факс: (3952) 42-56-84
ОКПО 02068226, ОГРН 1033801008218,
ИНН/КПП 3808013278/380801001
www.isu.ru, e-mail: dean@geogr.isu.ru

№ _____

О внедрении в учебный процесс

Справка о внедрении компонент ГИС Метео
в учебный процесс географического факультета
Иркутского государственного университета

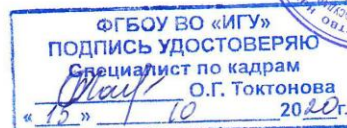
Настоящая справка подтверждает, что разработанные Ю.И. Юсуповым компоненты ГИС Метео: Изэнтропический анализ, Изэнтропические траектории, Фронты, Прогноз шквалов, Потенциальный вихрь, успешно внедрены сотрудниками кафедры метеорологии и физики околоземного космического пространства в учебный процесс географического факультета Иркутского государственного университета в 2019 г. и используются по настоящее время для синоптического анализа текущей и прогностической ситуации, изучения студентами физических процессов образования опасных явлений погоды на территории Иркутской области.

Заведующая кафедрой метеорологии и
физики околоземного космического пространства,
к.г.н., доцент

Латышева И.В.

Декан географического факультета,
к.г.н.

Воложкина С.Ж.



РОССИЙСКИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ КОНСОРЦИУМ



Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр «Мэп Мейкер»
Нововаганьковский пер., д. 5, стр. 1, Москва, 123242
Тел./факс: +7 495 989 15 95, эл. почта: org@gismeteo.ru

28 декабря 2020г Москва
СПРАВКА. № 3

Ю.И. Юсупову

Настоящая справка выдана Юрию Исааковичу Юсупову о том, что Программный Комплекс (ПК) ГИС Метео, принадлежащий нашей организации на праве собственности (Свидетельство ФИПС №2007614214 (ГИС Метео)) внедрён в оперативную эксплуатацию в 73 организациях Росгидромета в 164 экземплярах согласно прилагаемому списку.

Каждый пакет ПК ГИС Метео содержит программные средства, разработанные Ю.И. Юсуповым.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

1. Список организаций Росгидромета на 3 л.
2. Копия свидетельства ФИПС №2007614214 о регистрации на 1 л.

С уважением,
Генеральный директор
ООО «НПЦ «Мэп Мейкер»



Ю.Л. Шмелькин

Приложение к справке НПЦ "Мэп Мейкер" №3 от 28.12.2020
Список организаций Росгидромета, использующих ГИС Метео в ежедневной оперативной работе

1	2	3	4
	Организация	Адрес	К-во
1.	АМСГ Анадырь	686720 Чукотский АО, Анадырский район, п. Шахтерский-3, ул. Портовая, 6 аэропорт	1
2.	АМСГ Белоярская	626818 Тюменская обл. г. Радужный, аэропорт	1
3.	АМСГ Владивосток (Артем)	692800 Приморский край г. Артем ул. Портовая, 41 аэропорт	1
4.	АМСГ Волгоград	400036 г. Волгоград, аэропорт	2
5.	АМСГ Иркутск	664009 г. Иркутск, ул. Ширямова, 13 аэропорт	2
6.	АМСГ Мирный	678170 Республика Саха (Якутия), г. Мирный, аэропорт	2
7.	АМСГ Мурманск	184364 Мурманская обл. п. Мурмаши, аэропорт	2
8.	АМСГ Мыс Каменный	626703 Тюменская обл. Ямало-Ненецкий округ Ямальский р-н п. Мыс Каменный аэропорт	1
9.	АМСГ Н.Новгород	603056 г. Нижний Новгород, аэропорт	1
10.	АМСГ Оренбург	460049 г. Оренбург, аэропорт	1
11.	АМСГ Саратов	410010 г. Саратов ул. Жуковского, 25 аэропорт	1
12.	АМСГ Сочи	354355 Краснодарский край, г. Сочи, аэропорт	2
13.	АМСГ Ставрополь	355010 Ставропольский край, г. Ставрополь аэропорт	1
14.	АМСГ Сыктывкар	167610 Республика Коми г. Сыктывкар, ул. Советская, 67 аэропорт	1
15.	АМСГ Ульяновск	432040 г. Ульяновск, аэропорт	1
16.	АМСГ Уфа	450056 Республика Башкортостан, г. Уфа, аэропорт	1
17.	АМСГ Челябинск	454133 г. Челябинск, аэропорт	2
18.	АМСГ Чита	672018 г. Чита, аэропорт	1
19.	АМЦ Елизово -П.Камч	684010 Камчатская обл. г. Елизово, ул. Звездная, 1 аэропорт	2
20.	АМЦ Емельяново	663020 Красноярский край, Емельяновский р-н, п. Емельяново аэропорт	3
21.	АМЦ Магадан	685018 г. Магадан-18, Сокол аэропорт	2
22.	АМЦ Омск	644103 г. Омск ул. Инженерная, 1 аэропорт	1
23.	АМЦ Ростов-на-Дону	344066 г. Ростов-на-Дону, пр. Шолохова, 266/4 аэропорт	1
24.	АМЦ Самара	443046 г. Самара, аэропорт	1
25.	АМЦ Ханты-Мансийск	626200 Тюменская обл. г. Ханты-Мансийск аэропорт ОАО "Югравиа"	2
26.	АМЦ Южно-Сахалинск	693015 г. Южно-Сахалинск, аэропорт	4
27.	АМЦ Якутск	677014 Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Гагарина, 8 аэропорт	2
28.	ГАМЦ Внуково	103027 г. Москва, ул. Первая рейсовая, 12 аэропорт Внуково	6
29.	ГВЦ Росгидромета	123376 г. Москва, Б. Предтеченский пер., 9	2
30.	Бурятский ЦГМС (ГМБ Улан-Удэ)	670034 г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, 2а	1
31.	ГМБ Москвы и Моск. Обл.	123376 г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11	3
32.	ГМЦ России	123242 г. Москва, Б.Предтеченский пер., 9-13	20
33.	Метеоагентство ДВ	680030 г. Хабаровск, ул. Павловича, 16	1
34.	УГМС Башкирское	450059 Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Р. Зорге, 25/2	4
35.	УГМС Верхне-Волжское	603057 г. Нижний Новгород, ул. Бекетова, 10	3

36.	УГМС Дальневосточное	680673 г. Хабаровск, ул. Ленина, 18 .	3
37.	УГМС Забайкальское	672038 г. Чита-38, ул. Новобульварная, 165	3
38.	УГМС Западно-Сибир- ское	630099 г. Новосибирск-99 ул. Советская, 30 .	3
39.	УГМС Иркутское	664047 г. Иркутск, ул. Партизанская, 76	3
40.	УГМС Камчатское	683602 г. Петропавловск-Камчатский, ГСП, ул. Молчанова, 12	3
41.	УГМС Колымское	685000 г. Магадан, ул. Парковая, 7/13	3
42.	УГМС Мурманское	183789 г. Мурманск, ул. Шмидта, 23 .	3
43.	УГМС Обь-Иртышское	644046 г. Омск-46, ул. Маршала Жукова, 154 .	3
44.	УГМС Приволжское	443125 г. Самара, ул. Ново-Садовая, 325	3
45.	УГМС Приморское	690600 г. Владивосток, ГСП, ул. Мордовцева, 3	3
46.	УГМС Сахалинское	693000 г. Южно-Сахалинск, ул. Западная, 78,	3
47.	УГМС Северное	163020 г. Архангельск-20, ул. Маяковского, 2 .	3
48.	УГМС Северо-Западное	199026 г. Санкт-Петербург, В.О., 23 линия, 2а	3
49.	УГМС Северо-Кавказ- ское	344025 г. Ростов-на-Дону, ул. Ереванская, 1/7 .	3
50.	УГМС Средне-Сибирское	660049 г. Красноярск, ул. Сурикова, 28	3
51.	УГМС Уральское	620219 г. Екатеринбург, ГСП-327, ул. Народной Воли, 64	3
52.	УГМС ЦЧО Курск	305021 г. Курск, ул. К.Маркса, 76.	3
53.	УГМС Якутское	677010 Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Якова Потапова, 8	3
54.	ЦГМС Астрахань	414028 г. Астрахань, ул. Солнечная, 37 .	1
55.	ЦГМС Дагестанский	367012 Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Маячная, 18 .	1
56.	ЦГМС Волгоград	400013 г. Волгоград, ул. Гагарина, 12 .	2
57.	ЦГМС Вологодский	160012 г. Вологда, Советский проспект, 107	1
58.	ЦГМС Калининград	236000, г. Калининград, ул. Пугачева, 16	1
59.	ЦГМС Краснодар	350610 г. Краснодар, ул. Рашпилевская, 36	1
60.	ЦГМС Оренбург	460001 г. Оренбург, Красная площадь, 1 .	2
61.	ЦГМС Пенза	440004, г. Пенза, ул. Центральная, 14а .	1
62.	ЦГМС Пермь	614080 г. Пермь, ул. Логовая, 28	1
63.	ЦГМС Рязань	390000 г. Рязань, ул. Почтовая, 50 корп. 1 .	2
64.	ЦГМС Ставрополь	355000 г. Ставрополь, пр. Октябрьской Револю- ции, 6, а/я 60	2
65.	ЦГМС Ульяновск	432700 г. Ульяновск, ул. Гончарова, 32	1
66.	ЦГМС ЧАМ Сочи	354057, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Севастопольская, 25 .	2
67.	ЦГМС Челябинск	454126 г. Челябинск, ул. Витебская, 15	2
68.	ЦГМС Ярославль	150000 г. Ярославль, ул. Кирова, 5	3
69.	ЦГМС Киров	610014 г. Киров, ул. Тихая, 8	1
70.	ЦГМС Чувашский	428900 г. Новочебоксарск, ул. Промышлен- ная, 37	1
71.	ЦГМС Мордовский	430019 г. Саранск, ул. Щорса, 39	1
72.	ЦГМС Удмуртский	426053 г. Ижевск, ул. Ворошилова, 13а	1
73.	ЦГМС Марийский	424000 г. Йошкар-Ола, ул. Советская, 173 .	1
	ИТОГО	Количество рабочих мест	164

ПРИМЕЧАНИЯ-в таблице использованы следующие аббревиатуры:

1. АМСГ- авиационная метеостанция гражданская;
2. АМЦ- авиационный метеорологический центр;
3. ГАМЦ - Главный авиационный метеорологический центр Росгидромета;
4. ГВЦ - Главный вычислительный центр Росгидромета;
5. ЦГМС-территориальный Центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды;
6. ГМБ - гидрометеорологическое бюро;
7. ГМЦ России - Гидрометцентр России;
8. УГМС - управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды;
6. ГМБ - гидрометеорологическое бюро.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

об официальной регистрации программы для ЭВМ

№ 2007614214

Географическая информационная система «Метео»
(ГИС Метео)

Правообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр Мэп Мейкер» (RU)*

Автор(ы): *Соломахов Алексей Юльевич (RU)*

Заявка № 2007613750

Дата поступления 20 сентября 2007 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

3 октября 2007 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2009615057

Оперативная модель объективного изэнтропического анализа

Правообладатель(ли): **Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр «Мэп Мейкер» (RU)**

Автор(ы): **Юсупов Юрий Исаакович (RU)**

Заявка № 2009613953

Дата поступления **23 июля 2009 г.**

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
16 сентября 2009 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2009615058

Оперативная модель объективного фронтального анализа

Правообладатель(ли): **Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр «Мэн Мейкер» (RU)**

Автор(ы): **Юсупов Юрий Исаакович (RU)**

Заявка № 2009613954

Дата поступления **23 июля 2009 г.**

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
16 сентября 2009 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2009615056

Оперативная трехмерная траекторная модель

Правообладатель(ли): **Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр «Мэн Мейкер» (RU)**

Автор(ы): **Юсупов Юрий Исаакович (RU)**

Заявка № 2009613952

Дата поступления **23 июля 2009 г.**

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
16 сентября 2009 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2009615059

Оперативная модель формирования сильных шквалов

Правообладатель(ли): **Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр «Мэн Мейкер» (RU)**

Автор(ы): **Юсупов Юрий Исаакович (RU)**

Заявка № 2009613955

Дата поступления **23 июля 2009 г.**

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
16 сентября 2009 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ
КОМИССИЯ ПО СЕРТИФИКАЦИИ АЭРОДРОМОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

INTERSTATE AVIATION COMMITTEE
COMMISSION FOR AERODROME AND EQUIPMENT CERTIFICATION

СЕРТИФИКАТ ТИПА TYPE CERTIFICATE № 652

НАСТОЯЩИЙ СЕРТИФИКАТ ВЫДАН
THIS CERTIFICATE IS ISSUED TO

Обществу с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр «Мэп Мейкер»,
Россия, 123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., д. 13, стр. 1
Limited Company «Map Maker»,
Bld.1, 13 B.Predtechensky per., Moscow, 123242, Russia

И УДОСТОВЕРЯЕТ, ЧТО ТИПОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ
AND CERTIFIES THAT THE TYPE DESIGN OF

Программно-технологического комплекса «ГИС Метео» МИЦЖ.468339.001 с операционной
системой Windows 7 Professional и специализированным программным обеспечением:

• МИЦЖ.13912-01, включающим исполняемые файлы: TcpRcvGts.exe, Gtspp32.exe, Gribproc.exe, MapMakers.Bufr.Decoding.exe, Wgrib32.exe, Rgrib32.exe, MdbCopy.exe, DbUtils.exe; файлы справки: TcpRcvGts.chm, Gtspp32.chm, Gribproc.chm, Bufr.Decoding.chm, Wgrib32.chm, Rgrib32.chm, MdbCopy.chm, DbUtils.chm, — в серверах приема, обработки и хранения метеорологической информации с ключами защиты HASP Time (для основного сервера - зав. № GTSPpxx-01, для резервного сервера - зав. № GTSPpxx-02);

• МИЦЖ.13913-01, включающим исполняемые файлы: MapMaker.exe, MmShed.exe, MdbCopy.exe, DbUtils.exe, Avia32.exe, Alerts.exe, VcLogw.exe, Tplt.exe, T4View32.exe; библиотечные компоненты: geo.mm2, synop.mm2, splot.mm2, air.mm2, uplot.mm2, grib.mm2, Sigwx.mm2, Jetgrib.mm2, Symbols.mm2, Line.mm2, mmtext.mm2, Towns.mm2; файлы справки: MapMaker.chm, MmShed.chm, MdbCopy.chm, DbUtils.chm, Avia32.chm, Alerts.chm, VcLogw.chm, Tplt.chm, T4View32.chm, geo.chm, synop.chm, splot.chm, air.chm, uplot.chm, grib.chm, Sigwx.chm, Jetgrib.chm, Symbols.chm, Line.chm, mmtext.chm, Towns.chm и МИЦЖ.13914-01, включающим библиотечные компоненты: Surface.mm2, radob.mm2, otgrib.mm2, tra.mm2, trgrib.mm2, vert.mm2, front.mm2, fgrib.mm2, squall.mm2, storm.mm2, splfrc.mm2, mmad.mm2, radar.mm2, sat.mm2, sigwxfa.mm2, aplot.mm2, taf.mm2, amdar.mm2, airep.mm2, sigwxswl.mm2, cloud.mm2, ice.mm2, icegrib.mm2, cut.mm2, cutgrib.mm2, jetair.mm2, turb.mm2, turbgrib.mm2, layergb.mm2, gribl.mm2, wtable.mm2, tr3dgrib.mm2, crossi.mm2, grev2.mm2; файлы справки: Surface.chm, radob.chm, otgrib.chm, tra.chm, trgrib.chm, vert.chm, front.chm, fgrib.chm, squall.chm, storm.chm, splfrc.chm, mmad.chm, radar.chm, sat.chm, sigwxfa.chm, aplot.chm, taf.chm, amdar.chm, airep.chm, sigwxswl.chm, cloud.chm, ice.chm, icegrib.chm, cut.chm, cutgrib.chm, jetair.chm, turb.chm, turbgrib.chm, layergb.chm, gribl.chm, wtable.chm, tr3dgrib.chm, crossi.chm, grev2.chm, — в автоматизированных рабочих местах оператора с ключами защиты HASP Time, зав. № GISMExxx-01 – GISMExxx-04,

СООТВЕТСТВУЕТ СЕРТИФИКАЦИОННЫМ ТРЕБОВАНИЯМ.
COMPLIES WITH THE CERTIFICATION REQUIREMENTS.

ОГРАНИЧЕНИЯ ДЕЙСТВИЯ НАСТОЯЩЕГО СЕРТИФИКАТА СОДЕРЖАТСЯ В
ПРИЛОЖЕНИИ, ЯВЛЯЮЩЕМСЯ НЕОТЪЕМЛЕМОЙ ЧАСТЬЮ СЕРТИФИКАТА.
CERTIFICATE LIMITATIONS ARE CONTAINED IN THE APPENDIX FORMING AN INTEGRAL PART OF THIS CERTIFICATE.

21.04.2015
МОСКВА
MOSCOW



В.Н. Гончаров
Директор по сертификации
аэродромов и оборудования
V.N. Goncharov
Director, Aerodrome
and Equipment Certification