

На правах рукописи

ЮСУПОВ Юрий Исаакович

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

Специальность 25.00.29

Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»)

Научные руководители:

доктор физико-математических наук **Беркович Леопольд Владимирович**
ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

доктор физико-математических наук **Гордин Владимир Александрович**
профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор **Гордов Евгений Петрович**
главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук»

доктор физико-математических наук **Чхетиани Отто Гурамович**
заместитель директора, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Защита диссертации состоится «26 ноября» 2021 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 327.003.01 при федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте <https://meteoinfo.ru>

Автореферат разослан “__” _____ г.

Ученый секретарь Диссертационного совета

Кандидат физико-математических наук

М.В. Шатунова

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Прогнозы шквалов и интенсивных осадков являются одними из главных задач в 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.

Подход к созданию методов прогноза гроз, града, шквалов и интенсивных осадков основывается 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 (но недостаточно) выполнение трех условий: наличие динамического вынуждения, в результате которого осуществляется подъем воздушных частиц до уровня свободной конвекции; условная (влажная) неустойчивость атмосферы; наличие достаточной влажности (более 60%) в приземном слое. Основным критерий, с помощью которого оценивается возможность развития конвекции, состоит в определении запасов энергии неустойчивости. На практике в качестве критерия конвективной неустойчивости используется разность температуры частицы, поднимающейся адиабатически от поверхности земли или от наиболее неустойчивого приземного слоя, и температуры окружающей среды.

Однако, информация о стратификации температуры и влажности дает часть полной картины динамики атмосферы. Известны случаи, когда при развитии шквалов не было зафиксировано положительной энергии неустойчивости. В холодный период года лишь в 9% конвективные процессы связаны с конвективной неустойчивостью. Для описания метеорологических явлений синоптического масштаба изэнтропический анализ с привлечением полей вертикальной составляющей

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, является локальным инвариантом уравнений идеальной газовой динамики. В этой модели частицы воздуха 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, подтвержденные исследованиями, что в условиях глубокой влажной конвекции в бароклинной зоне в тропосфере образуются горизонтально ориентированные диполи – пары положительных и отрицательных аномалий потенциального вихря вблизи 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 изэнтропического тропосферного потенциального вихря Эртеля.

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

1. Создание компьютерной технологии для производства оперативного изэнтропического анализа.
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 структуры потенциального вихря в масштабе

мезо-γ 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 бароклинных зон.

3. Разработана и впервые реализована в оперативном режиме технология изэнтропического анализа на основе выходной информации гидродинамических моделей.

4. Впервые при исследовании мезомасштабной (мезо-γ) структуры потенциального вихря в средней и нижней тропосфере в условиях глубокой влажной конвекции с помощью расчетов по выходной информации модели WRF-ARW воспроизведены горизонтально ориентированные диполи аномалий потенциального вихря вблизи конвективного восходящего потока. Информация о присутствии диполей в индивидуальной грозовой ячейке позволяет использовать полученные результаты совместно с данными метеорологических радиолокаторов для наускастинга зон активной конвекции.

Достоверность и обоснованность 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 станционных наблюдений и информация метеорологических радиолокаторов, что позволило с большой точностью верифицировать разработанные в диссертации методы прогноза. Обоснованность основных результатов исследований подтверждается также публикациями в

научных журналах и представлением их на российских и международных конференциях.

Практическая значимость

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 Эртеля в средней тропосфере и приземных бароклинных зон.
4. Результаты исследования мезомасштабного потенциального вихря в условиях глубокой влажной конвекции с помощью расчетов по выходной информации негидростатической 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 докладывались 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. Петросянец и современные проблемы метеорологии и климатологии», 17 – 18 ноября 2009 г., Москва; 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; Семинар «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 (Акулиничева и др., 2001).

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.

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.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 76 наименований. Общий объем диссертации составляет 129 страниц. Диссертация содержит 42 рисунка и 14 таблиц.

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. Калинин 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.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов,

представлены выносимые на защиту научные положения. Также во введении описана структура диссертации и приводится список опубликованных автором статей и тезисов конференции, содержащих результаты работы.

Первая глава посвящена обзору современных методов прогноза атмосферной конвекции и связанных с ней явлений – шквалов и интенсивных осадков. В **первом параграфе первой главы** объяснены условия развития интенсивной конвекции. Изложены основные физические принципы прогноза интенсивной конвекции, приводятся основные методы прогноза конвекции. **Второй параграф первой главы** посвящен обзору методов прогноза интенсивных осадков в холодный период года. В **третьем параграфе первой главы** изложены известные методы прогноза шквалов.

Вторая глава посвящена разработке технологии изэнтропического анализа, функционирующей в оперативном режиме. На поверхности с постоянной потенциальной температурой θ также постоянна и энтропия, которая определяется как $\phi = c_p \ln \theta + \text{const}$. Способ представления данных различных метеорологических полей с использованием потенциальной температуры в качестве вертикальной координаты называется изэнтропическим анализом. В **первом параграфе второй главы** изложены основные принципы изэнтропического анализа. Главным преимуществом изэнтропического анализа по сравнению с изобарическим является возможность учета трехмерности атмосферных процессов. 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 в модели адиабатичности, движение воздушных частиц происходит по изэнтропическим траекториям. В подавляющем большинстве случаев обоснованным является допущение об адиабатичности процессов на масштабах временного осреднения 1-2 суток, так как на данных временных масштабах фазовые переходы в большинстве случаев являются обратимыми, а неадиабатические источники и стоки тепла в свободной атмосфере незначительны. С использованием данного допущения изэнтропические поверхности (в отличие от изобарических) можно рассматривать как материальные. Проводя траектории на изэнтропической поверхности, можно отслеживать изменения метеорологических характеристик в индивидуальных частицах.

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 прогностическую картину поля влажности, по сравнению с традиционным изобарическим анализом (Юсупов, 2012), что позволяет предположить, что изэнтропический анализ может обеспечить более успешное прогнозирование осадков синоптиком, чем изобарический анализ. С целью определения оценки зависимости от расстояния переноса влаги по направлению изэнтропического ветра, был проведен, по предложению В. А. Гордина эксперимент. В качестве исходной информации использовались данные ECMWF, с разрешением 0.25 градуса, за июнь – июль 2020 г., 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.

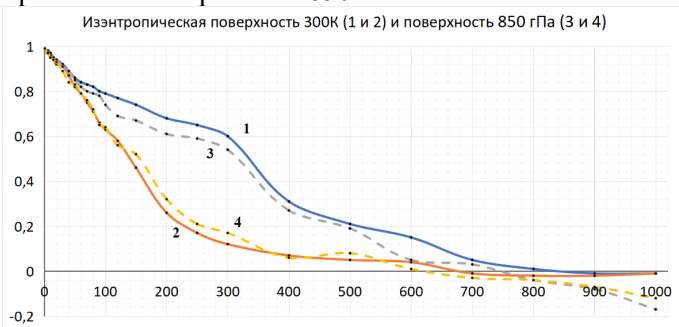


Рис.1. Корреляционные функции отклонения влажности от расстояния по ветру и в ортогональном направлении.

В результате (Рис. 1) была обнаружена сильная корреляционная зависимость влажности от перемещения по ветру на расстояние до 100 км, а также разница значений корреляционных функций при перемещении по ветру и в перпендикулярном направлении. Эта разница больше для изэнтропической поверхности 300К (кривые 1 и 2), чем для барической поверхности 850 гПа (кривые 3 и 4), что подтверждает предположение о том, что изэнтропический анализ больше подходит для прогноза осадков, чем изобарический анализ. Во **втором параграфе второй главы**

описывается технология изэнтропического анализа в архитектуре Автоматизированного рабочего места (АРМ) Синоптика. Для проведения изэнтропического анализа был создан модуль пересчета данных из изобарических координат в изэнтропические. Для интерполяции полей по вертикали использовались кубические сплайны дефекта 1 (сплайны Шонберга), 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.

Диссертантом был создан интерфейс работы с пользователем, позволяющий рассчитать на любой изэнтропической поверхности: давление, влажность, геопотенциал, скорость и направление ветра; меру статической устойчивости, которая обратно пропорциональна толщине слоя между двумя изэнтропическими поверхностями; 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: $T_c = \frac{c \gamma}{b - \gamma}$, где $\gamma = \ln \left(\frac{R}{100} e^{(b - \frac{T}{d})(\frac{T}{c + T})} \right)$, где R – относительная влажность в %, $b = 17.62$, $c = 243.12$ °C, $d = 234.5$ °C; абсолютный вихрь: $\Omega_a = \Omega + f$, где $\Omega = \partial v_\theta / \partial x - \partial u_\theta / \partial y$ – относительный вихрь, 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: $PV = \Omega_a (-g \partial \theta / \partial P)$. Для явлений синоптического масштаба рассматривается, только вертикальная компонента вектора потенциального вихря, его горизонтальные компоненты на 1-2 порядка меньше; эквивалентно-потенциальный вихрь: $PV_e = \Omega_a (-g \partial \theta_e / \partial P)$, где θ_e – эквивалентно-потенциальная температура: $\theta_e = \theta \exp \left(\frac{Lq}{c_p T} \right)$, где L – скрытая теплота парообразования, q – удельная влажность, T – температура на уровне конденсации; влажно-потенциальный вихрь: $PV_{es} = \Omega_a (-g \partial \theta_{es} / \partial P)$, где θ_{es} – эквивалентно-потенциальная температура в состоянии насыщения: $\theta_{es} = \theta \exp \left(\frac{Lq_s}{c_p T} \right)$, где q_s – удельная влажность в состоянии насыщения; вертикальные скорости в p -системе координат, которые рассчитываются как разности

давления в начальной и конечной точках траекторий, лежащих на одной изэнтропической поверхности, деленные на время, затраченное на прохождение траектории. Кроме того, производится расчет на поверхностях равного значения вертикальной компоненты потенциального вихря следующих параметров: потенциальной температуры, геопотенциала, давления, абсолютного вихря. В **третьем параграфе второй главы** описывается алгоритм построения изэнтропических траекторий. Показано, что трехмерные траектории могут существенно отличаться по результату от традиционных двумерных изобарических траекторий, обычно применяемых при анализе синоптических карт для детального составления прогноза погоды. В **четвертом параграфе второй главы** описываются примеры использования оперативного изэнтропического анализа на практике. В (Юсупов, 2012) автор проводит расследование сильного снегопада 7 декабря 2009 г. в Московском регионе с применением изэнтропического анализа. Результаты исследования показывают, что использование изэнтропического анализа позволяет прогнозировать сильные конвективные снегопады точнее, чем гидродинамическая модель, информация которой использовалась, как входные данные для изэнтропического анализа. Расчет количества осадков, выпавших в результате наклонной конвекции, отличался от фактических осадков не более, чем на 10% (абсолютные ошибки гидродинамических моделей составили от 500 до 800%).

В **третьей главе** излагается метод прогноза сильных конвективных осадков в холодный период года. В **первом параграфе третьей главы** обсуждаются известные методы прогноза конвективных осадков в холодное время года. Во **втором параграфе третьей главы** описывается алгоритм, реализующий разработанный метод. В предлагаемом алгоритме учитываются условия, необходимые для формирования конвективных осадков: наличие динамического вынуждения, в результате которого осуществляется подъем воздушных частиц до уровня свободной конвекции; условная неустойчивость атмосферы; наличие достаточной (не менее 80%) влажности в приземном слое. Для определения степени динамического вынуждения, используется дивергенция Q -вектора. Q -вектор определяется, как $\vec{Q} \equiv (Q_1, Q_2) = \left(-\frac{R}{p} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} \cdot \nabla T, -\frac{R}{p} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \cdot \nabla T \right)$, где $R = 287$ Дж кг⁻¹ К⁻¹ - универсальная газовая постоянная, p - давление, $\vec{V}$ - ветер.

В теплый период года главным типом неустойчивости, при которой формируются конвективные осадки, является конвективная неустойчивость. В холодный период года лишь 9% конвективных явлений связаны с конвективной неустойчивостью, а 68% связана с условной симметричной неустойчивостью. При симметричной неустойчивости частица, которая устойчива в отношении сил, действующих в вертикальном и горизонтальном направлениях, может быть неустойчива к наклонному смещению. Термин "условная" означает, что воздушная частица рассматривается в состоянии насыщения. Для прогноза условной симметричной неустойчивости используется расчет эквивалентно-потенциального вихря в состоянии насыщения - PV_{es} . Критерий появления условной симметричной неустойчивости – отрицательные значения PV_{es} . При разрешении условной симметричной неустойчивости реализуется наклонная конвекция.

Предлагается 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_{PV} , f_Q , f_R – функции, учитывающие вклад эквивалентно-потенциального вихря, дивергенции Q -вектора и относительной влажности R . Для потенциального вихря – это функция Хевисайда от PV_{es} , т.е. $f_{pv} = (|PV_{es}| - PV_{es})/2$, большие значения которой, как было указано ранее, соответствуют наибольшей вероятности условно-симметричной неустойчивости. Для Q -вектора - функция Хевисайда для дивергенции Q : $f_Q = \left[\left| \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right| - \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \right] / 2$. Для относительной влажности рассматривалась вероятностная модель. Ее математическое ожидание R равно значению, получаемому из расчетов гидродинамической модели $UKMO$ с заблаговременностью 6, 12, 18 ч, а дисперсия σ^2 рассчитывается как оценка максимального правдоподобия. Для относительной влажности получаем функцию $f_R = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{100-R}{\sigma\sqrt{2}}\right)$, где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$ – функция ошибок, R в процентах. При использовании модели $UKMO$ мы получили $\sigma = 12,7$. 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 $PVQR$: $PVQR = a_{925} PVQR_{925} + a_{850} PVQR_{850} + a_{700} PVQR_{700}$, где a_{925} , a_{850} , a_{700} - коэффициенты линейной регрессии,

$PVQR_{925}$, $PVQR_{850}$, $PVQR_{700}$ - значения функции на соответствующих изобарических поверхностях.

В третьем параграфе третьей главы представлены оценки эффективности прогноза сильных осадков в холодный период года с использованием каждого из предикторов в отдельности и с использованием комплексной функции $PVQR$. Проводится сравнение результатов расчета количества осадков на основе предлагаемой функции $PVQR$ с результатами прогноза осадков по модели $UKMO$ (Великобритания). Для расчета предикторов и определения их связи с количеством осадков использовали данные о полусуточных (дневных и ночных) суммах осадков на метеостанциях европейской территории России за холодные периоды 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 по модели $UKMO$ на сетке $1,25 \times 1,25^\circ$ (с декабря 2009 г. по февраль 2012 г.). В (Калинин, Юсупов, 2013) приведены рассчитанные регрессионные коэффициенты и пороговые значения, которые подбирались, чтобы получить максимальные значения критерия эффективности штормовых предупреждения и критерия Пирси - Обухова. Там же

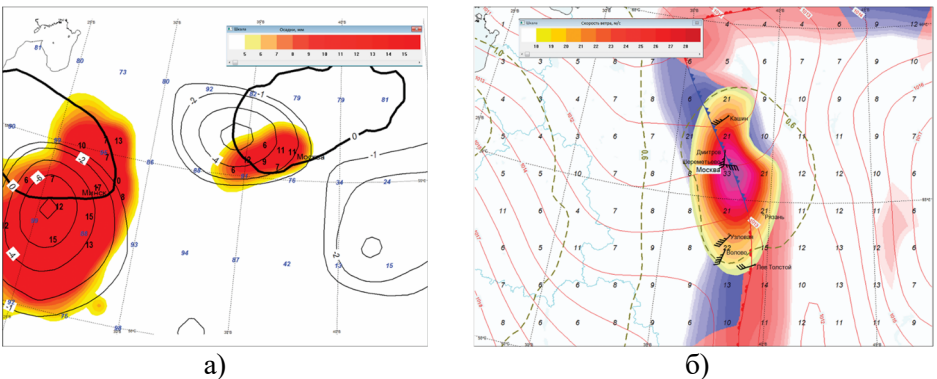


Рис.2. Прогноз осадков на 7.12.2009 г., забл. 18 ч. Изолинии дивергенции Q -вектора и PV_{es} , цифры – относительная влажность (синие) и фактические осадки (черные) (а). Прогноз шквалов на 21.06.1998 г. 0 ч ВСВ, забл. 12 ч. Изолинии давления на ур. моря (красн.) и PV (пунктир), цифры – рассчитанная скорость ветра при шквале (б).

представлена оценка эффективности прогноза сильных осадков с помощью функции $PVQR$ и приведено сравнение оценок качества прогнозов с помощью функции $PVQR$ и прогнозов осадков по модели $UKMO$ с

заблаговременностью 12 и 18 ч. Сравнение результатов показало, что использование функции $PVQR$ позволило существенно улучшить как значения критерия Пирси – Обухова (0,72 против 0,33), так и показатель оправдываемости штормовых предупреждений (0,48 против 0,29).

В четвертой главе излагается метод прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля. **В первом параграфе четвертой главы** дан обзор исследований, посвященных влиянию глубокой влажной конвекции и линии шквалов на формирование аномалии потенциального вихря в тропосфере. **Во втором параграфе четвертой главы** излагается алгоритм расчета предлагаемого метода. Большинство шквалов (более 80%, в том числе самые сильные) происходят на холодных фронтах. Одним из условий существования активных фронтальных зон является достаточное количество влаги в приземном слое. В окрестностях холодных фронтов, систематически формируются конвективно-неустойчивые или слабоустойчивые слои. Таким образом, в активной фронтальной зоне выполняются условия для развития глубокой влажной конвекции – наличие достаточной влаги в приземном слое и условной неустойчивости атмосферы.

В (Hoskins et al., 1985) взрывное понижение давления на поверхности земли (на 24 гПа или более за 24 ч.) объясняется мощными восходящими движениями, которые возникают при взаимодействии положительной (в Северном полушарии) аномалии потенциального вихря с бароклинными зонами в нижней тропосфере. 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 PV в тропосфере с одной стороны является признаком существования зон активной конвекции, с другой, 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.

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 необходимо исследовать распределение ветра на высотах, поскольку, шквалы образуются в результате опускания воздуха и переноса количества движения сверху вниз.

Положение бароклинических зон рассчитывается по методике (Huber-Pock, Cress, 1989). Функция, определяющая положение фронтальных линий, по этой методике представляется так: $\psi = \nabla |\nabla \xi| \cdot \vec{n}_\xi$, где ∇ - оператор градиента, $\nabla = i \partial / \partial x + j \partial / \partial y$, ξ - фронтальный параметр, $\vec{n}_\xi = -\frac{\nabla \xi}{|\nabla \xi|}$. В качестве фронтального параметра в используется эквивалентная «толщина» слоя от 850 до 500 гПа, определяемая следующим образом: $ZTE = -\sum_{850}^{500} \frac{R}{g} \bar{T}_e \ln(pu/pl)$, где $\bar{T}_e = (T_{e,u} - T_{e,l}) / \ln(T_{e,u}/T_{e,l})$ - средняя эквивалентная температура в слое: $T_e = T \exp(L q_m / C_p T)$, где L - скрытая теплота конденсации, q_m - отношение смеси, $C_p = 1.86$ кДж/(кг К) - удельная теплоемкость при постоянном давлении. Оригинальная формула эквивалентной толщины была модифицирована диссертантом добавлением данных на уровне 1000 гПа. Для устранения тех участков ψ , которые не соответствуют активным фронтальным зонам, используется индекс влажности: $HIX = (ZTE - ZT) / (ZTES - ZT)$, где ZT - толщина слоя 1000–500 гПа, $ZTES$ - значение эквивалентной «толщины» в состоянии насыщения, определяемое также как и ZT , но вместо q_m используется отношение смеси в состоянии насыщения. Значения $HIX > 0.7$ и $\psi > 2.5$ считаются необходимым условием для существования активных фронтальных зон. Наиболее опасные шквалы возникают на холодных фронтах, кроме того, только на холодном фронте возможно образование положительной температурной аномалии в нижней тропосфере, возникающей вследствие циклонической циркуляции в бароклинической зоне. Поэтому, в методе, разработанном в диссертации, предусмотрен алгоритм определения холодных и теплых участков фронта (по значению адвективного изменения ZTE): $A_g = -V \cdot \nabla ZTE$, где V - вектор ветра. Утверждается, что при $A_g < 0$ - определяется холодный фронт, при $A_g \geq 0$ - теплый.

Сделав предположение о независимости предикторов, для прогноза зон активной конвекции предлагается рассчитывать функцию F_e , определяемую, следующим образом: $F_e = \psi PV$, при $\psi < k_\psi$, $\psi = 0$; при $PV_{500} < k_{PV}$, $PV = 0$; при $A_g > 0$, $F_e = 0$ (k_ψ , k_{PV} - пороговые значения, найденные в результате статистической обработки). При $F_e > 0$ в точке сетки, для которой производился расчет, следует прогнозировать

глубокую влажную конвекцию. Сильный шквал возможен только в результате переноса нисходящим потоком количества горизонтального движения нижней половины тропосферы. Максимальную скорость ветра при шквале, в точках сетки, где $F_e > 0$, можно рассчитать, воспользовавшись методом (Песков, Снитковский, 1968):

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

где V – сумма скоростей ветра от Земли до изобарической поверхности 500 гПа, которая рассчитывалась так: $V = V_{1000} + V_{925} + V_{850} + V_{700} + V_{500}$.

В третьем параграфе четвертой главы приведены оценки эффективности прогноза шквалов по разработанному методу. Для расчета предикторов и определения их связи со шквалами использовались данные о фактических максимальных порывах ветра между сроками на метеостанциях европейской территории России за период с мая по октябрь 2012 г., прогностические поля метеовеличин (давление, геопотенциал, температура, ветер, влажность) с заблаговременностью 12 ч по модели *AVN* Вашингтон на сетке $1 \times 1^\circ$. 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 оценивалось с помощью критерия надежности Багрова - Хайдке Ba и критерия качества Пирси - Обухова PI . Пороговые значения предикторов подбирались таким образом, чтобы получить максимальные значения Ba и PI , соответственно. Полученные на диагностическом материале значения критериев Ba и PI для каждого из предикторов PV , ψ и $U_{\text{макс}}$ приведены в (Юсупов, 2013). Для оценки успешности прогноза шквалов разработанного метода была выбрана Европейская территория России. В (Юсупов, 2013) представлена матрица сопряженности для предлагаемого метода и результаты оценок успешности разработанного метода прогнозов шквалов, которые показали, что основное достижение разработанного метода, в резком уменьшении количества ложных тревог, по сравнению с другими известными методами прогноза шквалов, при сохранении достаточно высокой предупредительности и оправдываемости для такого явления.

В четвертом параграфе четвертой главы приведен пример применения разработанного метода. В (Юсупов, 2013) анализируются синоптические процессы 20-21 июня 1998 г. в Московском регионе. Исследование показало, что в результате взаимодействия аномалии

потенциального вихря в средней тропосфере с бароклинной зоной в нижней тропосфере, произошло падение давления (7 гПа/10 час) и развитие глубокой влажной конвекции, что явилось причиной возникновения шквала (Рис.2 б).

Пятая глава посвящена исследованию структуры мезомасштабного потенциального вихря в тропосфере при глубокой влажной конвекции. В **первом параграфе пятой главы** представлен обзор исследований, посвященных мезомасштабной (2 – 20 км) структуре тропосферного потенциального вихря в условиях глубокой влажной конвекции. В (Chagnon, Gray, 2009), на основании результатов моделирования, показано, что мезомасштабные потенциальные вихри в условиях глубокой влажной конвекции представляют собой горизонтально ориентированные диполи, состоящие из областей с положительными и отрицательными аномалиями вихря в средней тропосфере (Рис.3 а). Диполи образуются при развитии грозовой ячейки вблизи конвективного восходящего потока при наличии сдвига ветра (10 – 20 м/с в слое 0 – 6 км). Это было подтверждено в (Weijenborg et al., 2017), где обрабатывались результаты работы модели COSMO с шагом 7 x7 км.

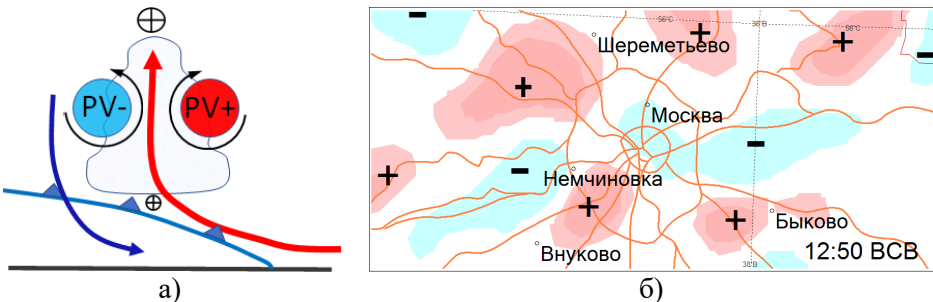


Рис.3. Схема расположения аномалий PV вблизи восходящего конвективного потока (а). Диполи PV над Москвой, по данным за 29.05.2017 0 ч ВСВ, забл. 12 ч 50 мин (б).

Во **втором параграфе пятой главы** проведено исследование структуры потенциального вихря при глубокой влажной конвекции с использованием результатов мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW. Впервые с помощью расчетов по выходной информации модели WRF-ARW удалось воспроизвести диполи аномалий потенциального вихря вокруг конвективного восходящего потока (Рис. 3 б). В эксперименте использовалась модель WRF-ARW версия 4.1. В качестве начальных граничных данных использовались данные

глобальной модели *KWBC* с разрешением $1/8$ градуса. Горизонтальное разрешение модели составляло 6×6 км, результаты выдавались каждые 10 минут. Для эксперимента автор выбрал случай особо опасного метеорологического явления шквала, произошедшего в Москве 29 мая 2017 года. В результате исследования было отмечено хорошее совпадение полей диполей потенциального вихря с данными метеорологических радиолокаторов. В динамике с 10-минутным шагом по времени удалось проследить зарождение диполей потенциального вихря, их эволюцию и диссипацию за период с 5:40 ч до 22:00 ч ВСВ. Грозовая ячейка состоит из конвективного восходящего потока и диполя PV , расположенного по разные стороны от восходящего потока. Зону восходящего потока можно определить, применив оператор градиента к скалярному полю PV . Однако, самые сильные порывы ветра будут находиться на границе между теплым и холодным воздухом (фронт порывистости). Представив грозовую ячейку как мезофронтальную систему, можно применить выражение для нахождения фронтального раздела: $\psi = \nabla |\nabla PV| \frac{\nabla PV}{|\nabla PV|}$, тогда, можно ожидать, что именно в этом месте, где находится фронт порывистости, будут самые разрушительные порывы ветра. Для оценки успешности применения поля ψ для прогноза конвекции сравнивались прогнозы, выполненные по полям ψ и показания метеорологических радиолокаторов за июль месяц 2020 г. по Центральному федеральному округу. Прогноз считался оправдавшимся, если в узле сетки 4×4 км одновременно с нашим прогнозом, явления погоды по данным радиолокатора показывали ливень, грозу, шквал или град. Пороговым значением для наличия явления в нашей методике являлось выполнение неравенства $\psi \geq \psi_* = 0.6 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1} \text{ Ккз}^{-1}$. Критерий Багрова – Хайдке составил 0,63, коэффициент ложных тревог – 0,25.

В третьем параграфе пятой главы описывается технология наукастинга, в которой для производства сверхкраткосрочного прогноза применяется технология блендинга фактических данных метеорологических радиолокаторов и прогностических данных, полученных в результате расчета модели WRF-ARW (Юсупов, 2016). В **заключении** приводится обобщение полученных результатов.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Разработана технология изэнтропического анализа для оперативного краткосрочного прогноза погоды. Возможность проведения

изэнтропического анализа, построения пространственных изэнтропических траекторий, расчетов потенциального вихря или параметров на уровнях равного значения потенциального вихря наряду с классическим изобарическим анализом, позволяет получить дополнительную информацию о процессах, происходящих в атмосфере, что может существенно повысить качество прогноза погоды.

2. Разработан и испытан метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодное время года с использованием таких крупномасштабных предикторов, как векторная фронтогенетическая функция, эквивалентно-потенциальный вихрь в состоянии насыщения и относительная влажность воздуха в нижней тропосфере. Качество прогнозов оценено с использованием выходной продукции модели *UKMO* и данных наблюдений за 2005 - 2012 гг.: критерий Пирси – Обухова 0,72.

3. Разработан и испытан метод прогноза шквалов с использованием расчета пересечения аномалии потенциального вихря Эртеля в средней тропосфере с бароклинными зонами в нижней тропосфере. Вычисленные по объемной выборке оценки успешности прогноза предлагаемого метода и их сравнение с оценками других современных методов прогноза шквалов, дает возможность сделать вывод о том, что метод имеет практическую значимость: критерий Пирси - Обухова 0,68, коэффициент ложных тревог 1,0.

4. Представлены результаты исследования тропосферного потенциального вихря в масштабе мезо-γ в условиях глубокой влажной конвекции. Впервые, по выходной информации гидродинамической модели *WRF-ARW* с горизонтальным разрешением 6х6 км, удалось рассчитать и воспроизвести горизонтально ориентированные диполи аномалий потенциального вихря в средней тропосфере вблизи конвективного восходящего потока. Мониторинг диполей потенциального вихря в тропосфере позволяет отследить эволюцию отдельной грозовой ячейки. Технология блендинга данных наблюдений метеорологических радиолокаторов и результатов расчета зон опасных явлений может существенно повысить качество наукастинга.

Список публикаций по теме диссертации

Работы, опубликованные в 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 теплобалансного 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. Наукастинг в технологии ГИС Метео. //Метеоспектр. – 2015. №1. – С.43-48.
19. Юсупов Ю. И. Комплексная система наукастинга 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. – С. 172.
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. 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.

Цитированная литература:

1. Песков Б. Е., Снитковский А. И. К прогнозу сильных шквалов. // Метеорология и гидрология. – 1968. – № 7. – С. 52 - 57.
2. Chagnon JM, Gray SL. Horizontal potential vorticity dipoles on the convective storm scale. //Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2009. – vol. 135. -pp. 1392–1408.
3. Hoskins B. J., McIntyre M. E & Robertson A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Q.J.R. Meteorol. Soc., – 1985, N 111: – P. 877 – 946.
4. Huber-Pock F., Kress Ch. An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products. Meteorol. Atmos. Phys. – 1989. – Vol.40, N 2: –P. 170 – 180.
5. Weijenborg, C., Chagnon, J.M., Friederichs, P., Gray, S.L. and Hense, A. Coherent evolution of potential vorticity anomalies associated with deep moist convection. //Q.J.R. Meteorol. Soc., 2017, vol.143(704), -pp.1254-1267.