

ОТЗЫВ
официального оппонента,
доктора физ.-матем. наук Чхетиани Отто Гурамовича
на диссертацию Юсупова Юрия Исааковича
«Прогноз шквалов и интенсивных осадков с применением термодинамических
параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
25.00.29 – физика атмосферы и гидросфера.

Диссертация Юсупова Ю.И. посвящена созданию новых фактически трехмерных методов краткосрочного прогноза шквалов и интенсивных осадков, основанных с использовании изэнтропического анализа и изэнтропического потенциального вихря Эртеля. Актуальность исследования обусловлена, в частности, увеличением частоты возникновения подобных явлений в современных условиях изменяющегося климата, требующих развития методов их предсказуемости с использованием возможностей современных численных технологий и представлений о динамике и физике динамических процессов разных в метеорологии.

Для достижения указанной цели исследования решались такие задачи как: разработка, создание и практическую реализацию компьютерной технологии изэнтропического анализа атмосферы, функционирующей в оперативном режиме; создание метода прогноза интенсивных осадков в холодный период года с использованием векторной фронтогенетической функции и изэнтропического потенциального вихря в состоянии насыщения; разрабатывался метод прогноза шквалов с использованием вихря Эртеля, проводилось исследование мезомасштабной (мезо-γ) структуры потенциального вихря в условиях глубокой влажной конвекции с использованием модели WRF-ARW, были выполнены авторские испытания разработанных методов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 129 страниц, включая 42 рисунка и 14 таблиц.

Во введении подчеркивается актуальность исследования, определены методы решения поставленных задач, сформулированы выносимые на защиту положения и кратко описана сама работа.

В первой главе довольно подробно рассмотрены используемые в оперативной деятельности методы анализа и прогноза активной конвекции в

атмосфере и связанных с этим процессом явлений – шквалов и интенсивных осадков.

Отмечается, что большинство методов прогноза конвекции основано на прямом или косвенном определении энергии неустойчивости. При этом, зачастую оказывается, что потенциальное присутствие энергии для неустойчивости не является достаточным условием инициализации самой конвекции. В то же время, методы прогноза интенсивных осадков в холодное время в большинстве основаны на использовании конвективной неустойчивости, хотя статистика показывает, что в этот период лишь в 9% случаев конвекция происходит в результате действия конвективной неустойчивости, а в 67% - в результате условной симметричной неустойчивости. Шквалы, особенно самые сильные, происходят на холодных фронтах. Однако, неизвестны автоматизированные методы прогноза шквалов с расчетом фронтальных зон.

Проведен анализ составляющих потенциального вихря. Отмечено, что для движений синоптического масштаба порядок вклада от горизонтальных движений равен 10^{-8} . Вертикальная составляющая потенциального вихря имеет при этом порядок 10^{-6} и является основным. Напротив, в пространственном масштабе конвективного шторма (2–20 км) для вычисления значения потенциального вихря необходимо учитывать все составляющие, поскольку в этом случае горизонтальные составляющие оказываются на порядок больше вертикальной. Соответственно, присутствие аномалии потенциального вихря синоптического масштаба в средней или нижней тропосфере является признаком глубокой влажной конвекции. Тогда как, в условиях глубокой влажной конвекции в бароклинической 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 научастинга при прогнозировании опасных и неблагоприятных явлений погоды, возникающих при глубокой влажной конвекции.

Во второй главе описана компьютерная технология для изэнтропического анализа с оперативной реализацией в рамках АРМ Синоптика. Отмечено, что исследование процессов в атмосфере с помощью изэнтропического анализа известно с 30-х годов прошлого века. Однако, в тот 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 горизонту примерно в 30 раз превосходит наклон изобарических поверхностей. Только в последнее время (с начала 90-х годов) с развитием вычислительных технологий появляется возможность для разработки подобных методов, с привлечением полей вертикальной составляющей потенциального вихря Эртеля, позволяет исследовать

атмосферные процессы различной природы более детально, по сравнению с традиционными подходами.

Главным преимуществом изэнтропического анализа по сравнению с изобарическим является возможность более удобного и наглядного учета трехмерности некоторых атмосферных процессов, таких 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.

Эффективность его применения продемонстрировано на примере конкретных случаев использования изэнтропического анализа на практике. В частности, для прогноза осадков в зимнее время. Представлены анализы аварийных летных ситуаций, случившихся в результате воздействия на воздушное судно спутного следа, на основании которых можно сделать выводы о связи угла наклона между изобарической поверхностью, по которой проложен маршрут, и изэнтропической поверхностью, по которой проложена траектория распространения спутного следа, со степенью воздействия следа. Предложены практические рекомендации. Безусловно, предлагаемая технология не может полностью заменить традиционный изобарический подход, но дополняет его важными деталями, позволяющими увидеть дополнительные оттенки атмосферных процессов, позволяющие уточнить прогноз.

В третьей главе рассматривается разрабатывается метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодное время года с использованием дивергенции Q -вектора (с которым связана вертикальная скорость), эквивалентно-потенциального вихря в состоянии насыщения и относительной влажности воздуха в нижней тропосфере. Задача эта является достаточно сложной, поскольку немалая часть событий оказывается слабо связанной с конвективной неустойчивостью. При разработке метода учитываются условия, считающиеся необходимыми для формирования конвективных осадков. Такие как, 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 относительной влажности рассматривалась вероятностная модель.

Метод реализован на выходной продукции модели UKMO и протестирован на данных за 2005 - 2012 гг. Сравнение результатов оценки разработанного метода показало значительное улучшение по сравнению с прогнозами осадков модели UKMO. Эффективность метода была проанализирована также на случаях сильных снегопадов в Центральном регионе России, когда прогнозы давали заниженное количество осадков. На рис. 21-22 представлены результаты разработанного метода, показывающие неплохое соответствие с фактическими событиями. В выводах к главе отмечено, что полученная комплексная прогностическая формула

позволяют сразу получать итоговую зону сильных конвективных осадков, так что отпадает необходимость в сопоставлении результатов, полученных по данным на разных уровнях, а также с картами относительной влажности.

В четвертой главе разрабатывается метод прогноза шквалов, предполагающий использование выходной информации различных гидродинамических моделей. Отмечается, что многие методики прогноза шквалов были автоматизированы диссертантом и включены в архитектуру АРМ Синоптика. В то же время, как оказалось, эти методы имеют большое количество ложных тревог, что затрудняет их применение. Разработанный здесь метод, в основу которого положены, в частности, условия развития глубокой влажной конвекции, включает в себя решение таких задач, как расчет вертикальной компоненты потенциального вихря Эртеля в тропосфере, нахождение фронтальных зон в нижней тропосфере и определение холодных фронтов, определение зон пересечения аномалий потенциального вихря с бароклиническими и фронтальными зонами с соответствующими расчетами максимальных порывов ветра в этих зонах.

Оценка эффективности метода проведена на данных о фактических максимальных порывах ветра на ЕТР с мая по октябрь 2012 года по прогнозным полям. Показано резкое уменьшение ложных тревог при сохранении достаточно высокой предупрежденности и оправдываемости такого явления. Сам метод проверяется на явлении ураганного ветра в Москве 20-21 июня 1998 года. В качестве примера интересно было бы увидеть и применение его к сравнительно недавним событиям, таким как 29 мая 2017 г., 21 апреля 2018 г. (Москва). Поскольку метод основан на определении зон активной конвекции, то диссертант предполагает, рассматривать возможность его применения при прогнозированию и таких явлений погоды, как сильные ливневые осадки, град, грозы.

В пятой главе рассматривается структура тропосферного потенциального мезо-масштабного вихря в условиях глубокой влажной конвекции. Поскольку потенциальный вихрь сохраняет свое значение в частицах, если выполняется условие адиабатичности, то его изменение со временем может служить индикатором нагрева при выделении скрытой теплоты конденсации, что позволяет использовать соответствующие прогностические поля при прогнозе зон активной конвекции. Однако, известный индикатор *CAPE* отражает лишь частично полную динамическую картину. В начале 90-х появились работы, показывающие, что мезомасштабные потенциальные вихри в случае глубокой влажной конвекции представляют из себя горизонтально ориентированные диполи с положительными и отрицательными аномалиями в средней тропосфере. Причем, значения таких аномалий оказывались примерно на порядок больше, чем для потенциального вихря синоптического масштаба в средней тропосфере.

Диссидентанту впервые удалось воспроизвести развитие таких аномалий 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. Однако, как уже говорилось, в случае расчета мезомасштабного (2 – 20 км) потенциального вихря обязательно необходимо учесть и горизонтальные составляющие, которые могут быть на порядок больше вертикальной составляющей. В качестве объекта исследований был выбран как раз упоминаемый выше случай разрушительного шквала 29 мая 2017 года в Москве. Был выполнен достаточно глубокий анализ полученных результатов, показано развитие и перемещение дипольных пар, причем не единичных. Центры диполей находились на расстоянии 30 км друг от друга, горизонтальные размеры положительных и отрицательных потенциальных вихрей составляли 10 – 15 км. Проанализированы были причины развития таких структур.

Подобным образом 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. Также исследован один случай сильного снегопада, прошедшего в Москве 17 апреля 2020 г. И в этом случае моделью 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.

Здесь можно отметить, что дипольная структура для таких событий воспроизводится и в поле спиральности (А.А. Макоско), что не удивительно, поскольку спиральность имеет прямую связь с потенциальной завихренностью.

Из результатов следует, что расчет и визуализация мезомасштабного потенциального вихря в оперативном режиме работы способно оказать помощь дежурному синоптику в определении бароклинических зон и зон активной конвекции, позволяет локализовать место наибольших порывов ветра при глубокой влажной конвекции. Проверка успешности прогноза и данных наблюдений по метеорологическим радиолокаторам показало следующие результаты: критерий Багрова-Хайдке 0,63, коэффициент ложных тревог 0,25.

Также в главе разработана технология наукастинга, по которой для расчета сверхкраткосрочного прогноза явлений погоды, используется блэндинг\синтез данных наблюдений метеорологических радиолокаторов и результатов прогноза зон опасных явлений, рассчитанных по мезомасштабной модели WRF-ARW. Такая технология блэндинга по мнению диссертанта позволяет свести к минимуму ошибки прогноза в пределах ближайших 6 час, вызванные несовершенством

гидродинамических моделей и провести быструю настройку на другие виды данных наблюдений – профилемеры, лидары, содары и т. п..

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Основным достоинством рассматриваемой диссертационной работы является привлечение современных теоретических понятий и подходов к решению практических задач прогноза опасных метеорологических явлений. Автором впервые разработана оперативная технология изэнтропического анализа, впервые разработан метод прогноза зон осадков в холодное время года, развит оригинальный метод прогноза шквалов, использующий поля распределений потенциальной завихренности, исследована структура распределений тропосферного потенциального вихря в условиях глубокой влажной конвекции. Впервые подробно исследована структура вихревых диполей, возникающих в процессе глубокой конвекции. Следует особо отметить детальный синоптический анализ причин возникновения двух конкретных чрезвычайных ситуаций в авиации (ЧП в Армении и Дубае).

В качестве замечаний отметим следующее:

1. Важные результаты работы связаны с применением понятия потенциального вихря (и анализа его распределений) к задачам прогноза. Здесь можно было бы отметить, что сама идея о таком применении впервые была отмечена в работах А. М. Обухова, например:

Обухов А.М. Адиабатические инварианты атмосферных процессов// Метеорология и гидрология. 1964. №2. С. 3-9.

Обухов А.М. О потенциальном вихре// Н.Е. Кочин и развитие механики. М. : Наука. 1984. С. 84-93

Для движений синоптического масштаба этот вопрос впоследствии детально исследовался в работах (сотрудников ИФА)

М.В. Курганский, М.С. Татарская . Применение понятия потенциального вихря в метеорологии (Обзор) // Изв. АН СССР . Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 23. №8. С. 787-814

М.В. Курганский, М.С. Татарская . Адиабатические инварианты крупномасштабных атмосферных процессов // Изв. АН СССР . Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. №12. С. 1223-1236

и монографии (есть ссылка)

Курганский М.В. Введение в крупномасштабную динамику атмосферы. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1993. - 167 с.

Диссертант впервые привлекает анализ распределений потенциального вихря к мелкомасштабным движениям , однако, имело бы смысл дать ссылки на указанные пионерские работы.

2. Диссертант широко использует понятие Q вектора, приводя лишь формулы для его расчета и без пояснения его физического и математического смысла. Желательно привести соответствующие пояснения в тексте.

3. Исследованию проблемы симметричной неустойчивости и анализу ее физической природы посвящена обширная литература. В диссертации этой важной проблеме посвящено лишь несколько предложений. Имело бы смысл остановиться на этом подробнее.

4. Использование некоторых терминов выглядит как опечатки. Так на стр. 45 и других местах написано «изолинии давления поверхности потенциальной температуры, равной 285К» Более правильно писать – изолинии давления на поверхности потенциальной температуры.

5. В некоторых местах диссертант пишет о квазигеострофическом потенциальном вихре как о физическом объекте. В действительности это расчетная характеристика, для которой часто используется сокращение PV (в других местах используется такое обозначение). Желательно унифицировать применение термина.

6. Также опечатка на стр. 77. Стоит «Из Табл. 10 видно, что основное достижение разработанного метода в резком уменьшении ложных тревог» Правильно Из Табл. 10 видно, что основное достижение разработанного метода состоит в резком уменьшении ложных тревог» Пропущено слово

Сделанные замечания не умаляют общей высокой оценки работы Отмеченные недостатки не влияют на общую высокую положительную оценку работы.

Оценивая работу в целом, отметим следующее.

Диссертация выполнена на высоком научном и профессиональном уровне и является законченной научно-исследовательской работой, являющейся новым важным и существенным шагом в синтезе современных тенденций в динамической метеорологии и прогнозных алгоритмов и технологий в области исследований опасных и экономически затратных явлений погоды, таких как шквалы интенсивные осадки, грозы. В диссертации решены важные научные и практические задачи. Полученные результаты достоверны и находят научно-практическое применение в оперативной синоптической деятельности. Содержание диссертации соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Работа хорошо оформлена. Автограферат соответствует содержанию диссертации. Хотелось бы отметить добротное и качественное изложение и «читабельность» всего текста в целом, четко сформулированные выводы в конце

каждой главы. Опубликованные в ведущих научных журналах результаты Ю.И. Юсупова, докладывавшиеся также на российских и международных конференциях, свидетельства об оперативном, практическом и учебно-методическом внедрении, зарегистрированные программы достаточно полно отражают результаты, полученные в диссертации, и подтверждают их научную и практическую значимость.

Все сказанное, позволяет заключить, что диссертационная работа «Прогноз шквалов и интенсивных осадков с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу и отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы, а ее автор, Юсупов Ирий Исаакович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

Чхетиани Отто Гурамович

доктор физико-математических наук

шифр специальности оппонента – 01.04.02 «теоретическая физика»

Заместитель директора по науке \ Заведующий лабораторией геофизической гидродинамики

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение науки
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3

Рабочий телефон 8 (495) 951 84 80

E-mail: lgg@ifaran.ru

10 ноября 2021 года



/О.Г. Чхетиани/

Подпись О.Г. Чхетиани заверяю

Ученый секретарь ИФА им. А.М. Обухова РАН

Канд. геогр. наук

/Л.Д. Краснокутская/

