Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Пермский государственный национальный исследовательский университет»

На правах рукописи

### Быков Алексей Васильевич

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ КОНВЕКТИВНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА УРАЛЕ

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор Н.А. Калинин

Пермь, 2018

## оглавление

ВВЕДЕНИЕ
1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ОПАСНЫХ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ КОНВЕКТИВНОГО
ПРОИСХОЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ
1.1. Опасные метеорологические явления конвективного происхождения 13
1.2. Физико-статистические параметры неустойчивости 17
1.2.1. Индексы, основанные на методе частицы18
1.2.2. Индексы, полученные путем расчета параметров ветра на различных
высотах или изобарических поверхностях
1.2.3. Индексы, основанные на расчете температурно-влажностных
характеристик атмосферы23
1.2.4. Комплексные индексы неустойчивости
1.3. Современные глобальные модели атмосферы
1.4. Современные мезомасштабные модели атмосферы 34
1.5. Выводы по главе 141
2. ПРОГНОЗ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
КОНВЕКТИВНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИКО-
СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ГЛОБАЛЬНЫХ
МОДЕЛЕИ АТМОСФЕРЫ
2.1. База данных опасных метеорологических явлений Пермского края 42
2.2. Система получения модельных данных
2.3. Реализация расчета индексов неустойчивости в OpenGrADS 51
2.4. Оценка качества прогноза опасных метеорологических явлений
конвективного происхождения при помощи индексов неустойчивости по
данным моделей GFS и GEM53
2.5. Создание индекса неустойчивости атмосферы, основанного на
модификации метода частицы58

2.6. Выводы по главе 2
3. ПРОГНОЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕЗОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ
3.1. Исходные данные и методика исследования
3.2. Подбор параметризации глубокой конвекции
3.3. Оценка применимости прямого моделирования конвекции для прогнозирования мезомасштабных конвективных систем
3.4. Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением модели WRF с динамическими ядрами ARW и NMM77
3.5. Примеры моделирования мезомасштабных конвективных систем с опасными явлениями погоды
3.5.1. Мезомасштабный конвективный комплекс 18 июля 2012 года 84
3.5.2. Мезомасштабный конвективный комплекс 17 августа 2014 года 87
3.5.3. Мезомасштабный конвективный комплекс 24—25 июля 2015 года 90
3.6. Использование вложенных расчетных областей для прогноза мезомасштабных конвективных систем
3.7. Выводы по главе 396
4. ПРОГНОЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ С СИЛЬНЫМИ СМЕРЧАМИ
4.1. Примеры моделирования мезомасштабных конвективных систем с сильными смерчами 7 июня 2009 года и 29 августа 2014 года
4.1.1. Характеристика рассматриваемых случаев смерчей 100
4.1.2. Анализ смерчеопасной ситуации 7 июня 2009 года 102
4.1.3. Анализ смерчеопасной ситуации 29 августа 2014 года 106
4.2. Прогноз мезомасштабных конвективных систем со смерчами с
применением вложенных расчетных областей108
4.2.1. Условия развития шквалов и смерчей 3 июня 2017 года 108
4.2.2. Условия развития шквалов и смерчей 18 июня 2017 года 110
4.2.3. Анализ результатов прогноза мезомасштабных конвективных систем со смерчами

4.3. Численное моделирование случаев вспышек смерчей на Урале и		
Европейской территории России	. 116	
4.3.1. Синоптические условия формирования смерчей	. 119	
4.3.2. Численное моделирование мезомасштабных конвективных систем	1 CO	
смерчами	. 126	
4.4. Выводы по главе 4	. 135	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	. 136	
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	. 139	

#### введение

Актуальность работы. В настоящее время развитие информационных технологий и рост вычислительных мощностей позволяют решать задачи, требующие значительных вычислительных ресурсов. Одной из таких задач является моделирование состояния атмосферы и прогноз погоды. Для решения этой задачи во многих странах мира разработаны различные прогностические модели, которые постоянно совершенствуются. Одни модели предназначены для моделирования атмосферных процессов по всему земному шару, в то время как другие предназначены для прогноза погоды на территории какого-либо региона.

Особый интерес представляет прогноз развития атмосферной конвекции и связанных с нею опасных метеорологических явлений при помощи современных моделей атмосферы. Для решения данной проблемы в мире используется два основных подхода: 1) использование физико-статистических параметров неустойчивости атмосферы, определяемых по данным глобальных моделей атмосферы; 2) моделирование конвекции по данным мезомасштабных моделей атмосферы с высоким пространственным разрешением.

В настоящее время прогностические модели постоянно совершенствуются, растет их пространственное разрешение, повышается качество воспроизведения атмосферных процессов. Таким образом, в ближайшие годы тема моделирования атмосферной конвекции и связанных с ее развитием опасных метеорологических явлений будет оставаться актуальной.

Территория Урала характеризуется сложным рельефом, который оказывает влияние на развитие и эволюцию конвективных систем, а также на характер связанных с ними метеорологических явлений, что затрудняет задачу прогноза атмосферной конвекции. При этом своевременный прогноз опасных метеорологических явлений необходим для обеспечения бесперебойной работы многих отраслей экономики, что также подтверждает актуальность выбранной темы.

Цель работы: выявить условия формирования опасных метеорологических явлений конвективного происхождения на Урале для повышения качества их диагноза и прогноза с помощью глобальных и мезомасштабных моделей атмосферы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Создать оперативно пополняемую базу данных, содержащую сведения об опасных метеорологических явлениях, зарегистрированных на территории Пермского края с 1990 г. по результатам стандартных метеорологических наблюдений, а также свидетельствам очевидцев и других косвенных признаков.

2. Определить возможности применения физико-статистических параметров неустойчивости атмосферы, рассчитываемых по данным различных глобальных моделей атмосферы, для оценки вероятности возникновения опасных метеорологических явлений конвективного происхождения.

3. Осуществить подбор оптимальной конфигурации мезомасштабной прогностической модели WRF, обеспечивающей получение наиболее качественного прогноза мезомасштабных конвективных систем, и связанных с ними опасных метеорологических явлений.

4. Оценить качество диагноза и прогноза мезомасштабных конвективных систем, генерирующих сильные смерчи.

Объектом исследования являются опасные природные явления.

**Предметом исследования** являются опасные метеорологические явления, связанные с развитием систем глубокой конвекции.

#### Материалами для исследования послужили:

1. Данные об опасных метеорологических явлениях, зарегистрированных на территории Пермского края с 1990 г. Данные были получены из метеорологических ежемесячников Пермского ЦГМС, содержащих архивы наблюдательной сети. Кроме того, сведения об опасных явлениях получены путем сбора свидетельств очевидцев, а также поиска ветровалов на снимках со спутников серий LANDSAT, SENTINEL и SPOT.

2. Оперативные данные счета глобальных прогностических моделей СМС-GEM (Канада), NCEP-GFS (США), ПЛАВ (Россия) в кодах GRIB-1,2.

3. Оперативно пополняемые архивы данных реанализов NCEP-GFS (США) с 2007 г. и NCEP-CFS (США) с 1990 г. в коде GRIB-2.

4. Оперативно пополняемые архивы данных о радиационной температуре на верхней границе облачности со снимков Terra/Aqua MODIS с 2001 г. и МЕТЕОSAT-8 с 2017 г.

5. Данные счета мезомасштабной модели WRF версий 3.6.1—3.9.1.1 с динамическими ядрами ARW и NMM, в том числе полученные с помощью суперкомпьютера «ПГНИУ-Кеплер».

Для решения поставленных задач в работе применялись следующие методы и подходы:

1. Для оценки качества прогноза опасных метеорологических явлений глобальными моделями атмосферы применялся критерий Пирса-Обухова.

2. Для оценки качества моделирования и прогноза мезомасштабных конвективных систем мезомасштабными моделями атмосферы применялся объектно-ориентированный подход.

3. Для обработки выходных данных прогностических моделей, результатов расчетов индексов неустойчивости, анализа спутниковой информации и создания иллюстраций применялись геоинформационные системы QGIS и ArcGIS.

4. Для автоматического получения, обработки и визуализации выходных данных глобальных прогностических моделей, а также для расчета индексов неустойчивости были разработаны скрипты (расширения функциональных возможностей) для операционной системы Linux и программного комплекса OpenGrADS.

5. Для моделирования и прогноза использовался программный комплекс WRF версий 3.6.1—3.9.1.1 с динамическими ядрами ARW и NMM, установленный, в том числе, на суперкомпьютере «ПГНИУ-Кеплер».

6. Для создания базы данных опасных метеорологических явлений был разработан программный комплекс на основе платформы ASP.NET.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые для анализа пространственно-временной изменчивости опасных метеорологических явлений на территории Пермского края создана региональная оперативно пополняемая информационно-аналитическая онлайн-база данных, содержащая сведения, полученные не только по результатам стандартных метеорологических наблюдений, но и спутникового мониторинга, а также сбора свидетельств очевидцев.

2. Впервые для прогноза мезомасштабных конвективных систем и связанных с ними опасных метеорологических явлений были получены пороговые значения физико-статистических параметров (индексов) неустойчивости, применимых для территории Урала, рассчитываемых по выходным данным глобальных моделей атмосферы.

3. Впервые показано, что отечественная глобальная модель атмосферы ПЛАВ обладает наилучшим качеством воспроизведения синоптического положения на территории Урала, что обеспечивает лучшую достоверность прогноза опасных метеорологических явлений конвективного происхождения.

4. Создана модификация индекса плавучести, основанного на известном методе частицы, которая позволила добиться увеличения количества оправдавшихся прогнозов опасных метеорологических явлений по сравнению с аналогом.

5. Впервые предложена, апробирована и успешно верифицирована конфигурация модели WRF, оптимальная для прогноза мезомасштабных систем глубокой конвекции и связанных с ними опасных метеорологических явлений на территории Урала, включая сильные смерчи, с применением суперкомпьютерных технологий.

Практическая значимость. Полученные результаты демонстрируют важность учета региональных особенностей для прогноза опасных метеорологиче-

ских явлений. На основании применения современных подходов к прогнозированию глубокой конвекции были сформулированы рекомендации по использованию глобальных моделей атмосферы и рассчитываемых на их выходных данных физико-статистических параметров неустойчивости применительно к территории Урала. Также показана перспективность применения современных технологий мезомасштабного моделирования для решения задач прогноза мезомасштабных конвективных систем на территории Урала, включая детализацию связанных с ними опасных метеорологических явлений. Материалы исследования использованы при разработке курса лекций в программе дисциплины «Динамическая метеорология» на кафедре метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета.

Апробация работы. Основные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, были представлены на 2 международных 5 всероссийских конференциях:

1. XIII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса», г. Москва, 16—20 ноября 2015 г.

2. Международная научно-практическая конференция «География и регион», г. Пермь, 23—25 сентября 2015 г.

3. IV Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», г. Санкт-Петербург, 20—21 апреля 2016 г.

4. XIV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса», г. Москва, 14—18 ноября 2016 г.

5. Международная научно-практическая конференция «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века», г. Казань, 27—29 сентября 2017 г.

6. Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы географии и геологии. К 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете», г. Томск, 16—19 октября 2017 г.

7. XV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса», г. Москва, 13—17 ноября 2017 г.

Основные результаты работы доложены соискателем на научном семинаре в ФГБУ «Гидрометцентр России» 14 августа 2018 г.

Результаты диссертации использовались при выполнении работ по 2 НИР, финансируемым РФФИ:

1. «Синоптические условия формирования и развития шквалов на Урале» (2016—2018 гг.).

2. «Исследование сильных летних осадков на Урале с использованием гидродинамических моделей атмосферы» (2017—2019 гг.).

По теме диссертации опубликовано 16 работ, включая 7 статей в журналах из списка ВАК РФ, из которых 5 работ в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Разработанный автором программный код базы данных опасных метеорологических явлений зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Все анализируемые результаты работы получены автором лично. В частности, автором самостоятельно разработана база данных опасных метеорологических явлений, получены и обработаны при помощи созданных автором программ для ЭВМ данные глобальных моделей атмосферы, проведены численные эксперименты с моделью WRF, интерпретированы результаты моделирования и прогноза. Подготовка к печати научных работ, отражающих результаты исследований, осуществлялась как самостоятельно, так и при участии соавторов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, включающего 119 наименова-

ний, в том числе 68 зарубежных. Общий объем работы составляет 151 страницу. Работа содержит 27 цветных рисунков и 23 таблицы.

В первой главе рассмотрен обзор литературы по проблеме прогнозирования опасных метеорологических явлений конвективного происхождения. Приводится описание опасных явлений и систем глубокой конвекции, с которыми они связаны. Рассмотрены и классифицированы физико-статистические параметры (индексы) неустойчивости, предназначенные для прогноза опасных явлений. Приводится описание современных глобальных и мезомасштабных прогностических моделей, а также методик их применения для прогноза конвективных явлений.

Во второй главе представлены результаты оценки качества опасных метеорологических явлений индексами неустойчивости, рассчитываемыми на выходных данных глобальных прогностических моделей. Описана база данных опасных метеорологических явлений, зарегистрированных в Пермском крае. Раскрыты технические особенности получения и обработки данных прогностических моделей. Представлены расчеты статистических критериев, а также сравнение результатов расчета с данными наблюдательной сети и температурой верхней границы облачности, полученной со спутников Terra/Aqua. Сформулированы рекомендации по применению индексов неустойчивости и глобальных прогностических моделей для прогноза опасных явлений, связанных с развитием конвекции.

В третьей главе представлены результаты оценки качества прогноза мезомасштабных конвективных систем при помощи мезомасштабной модели WRF. Приведено обоснование отказа от процедур параметризации конвекции в пользу прямого моделирования конвективных течений на расчетных областях с высоким пространственным разрешением. Проведена оценка качества прогноза с применением объектно-ориентированного подхода. Выявлена зависимость качества воспроизведения систем глубокой конвекции от качества начальных и

граничных условий. Приведены примеры прогноза систем глубокой конвекции с опасными явлениями.

В четвертой главе представлены результаты оценки качества прогноза глобальными и мезомасштабными прогностическими моделями мезомасштабных конвективных систем с сильными смерчами. Описаны синоптические условия формирования сильных смерчей и их серий на Урале. Выявлена зависимость качества воспроизведения систем глубокой конвекции от качества начальных и граничных условий. Приведена оценка качества воспроизведения серий смерчей мезомасштабной моделью WRF.

В заключении приведены основные результаты работы.

## 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ КОНВЕКТИВНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ

#### 1.1. Опасные метеорологические явления конвективного происхождения

Развитие кучево-дождевых облаков иногда может приводить к возникновению опасных метеорологических явлений. Под опасным метеорологическим явлением (ОЯ) понимаются природные явления, возникающие в атмосфере и (или) у поверхности Земли, которые по своей интенсивности (силе), масштабу распространения и продолжительности оказывают или могут оказать поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую среду [42].

Таблица 1.1

Наименование ОЯ	Характеристика, критерии ОЯ
Шквал	Резкое кратковременное (в течение нескольких минут, но не
	менее 1 мин) усиление ветра до 25 м/с и более
Смерч	Сильный маломасштабный вихрь в виде столба или воронки,
	направленный от облака к подстилающей поверхности
Сильный ливень	Сильный ливневый дождь с количеством осадков 30 мм и бо-
	лее за период не более 1 ч
Крупный град	Град диаметром 20 мм и более
Очень сильный дождь	Значительные жидкие или смешанные осадки (дождь, дождь со
	снегом, мокрый снег) с количеством не менее 50 мм (в ливне-
	опасных горных районах не менее 30 мм) за период не более
	12 <i>ч</i>
КНЯ: Град, ливень, силь-	Гроза с градом диаметром от 5 до 19 мм, ливнем (количество
ный дождь,	осадков за период не более 1 ч от 20 до 29 мм) или дождем
сильный ветер, гроза	(количество осадков за период не более 12 ч от 35 до 49 мм,
	в горных районах от 25 до 29 мм), и максимальной скоростью
	ветра от 17 до 24 м/с.

## Критерии конвективных опасных метеорологических явлений, утвержденные для территории деятельности Уральского УГМС

Критерии опасных метеорологических явлений, связанных с развитием атмосферной конвекции, указаны в табл. 1.1. Данные критерии приняты в Уральском управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Уральском УГМС) [49] с 2009 года [42]. Кроме того, в табл. 1.1 включен комплекс неблагоприятных метеорологических явлений (КНЯ), сочетание которых образует ОЯ.

Критерии ОЯ разрабатываются для каждого конкретного региона с учетом его рельефа и других особенностей [26, 40].

Конвекция как форма тепло- и массобмена чрезвычайно распространена в атмосфере Земли и реализуется в результате потери статической устойчивости горизонтальных слоев воздуха. Атмосферную конвекцию условно разделяют на мелкую и глубокую. Физически это оправданно, потому что условия погоды при развитии мелкой и глубокой конвекции существенно различаются. К мелкой конвекции относят системы течений, развивающихся в неустойчиво стратифицированных горизонтальных слоях воздуха толщиной до 2—3 *км*. При мелкой конвекции вклад неадиабатических факторов, связанных с процессами образования осадков, незначителен. Мелкая конвекция представлена слоистокучевыми и кучевыми облаками и с ней не связаны опасные явления погоды [17].

Глубокая конвекция развивается в слоях большой вертикальной протяженности, охватывающих всю тропосферу, а иногда и нижние слои стратосферы. Основное отличие глубокой конвекции от мелкой состоит в том, что важную роль в ее развитии играют другие процессы, связанные с фазовыми переходами воды в атмосфере. Другая особенность глубокой конвекции — то, что вследствие ее больших вертикальных и горизонтальных масштабов существенное влияние на нее оказывают неоднородность метеорологических полей синоптического масштаба, вращение Земли и неоднородность подстилающей поверхности [17].

Известны разные классификации систем глубокой конвекции. Наиболее удобной как с генетической, так и с морфологической точек зрения является классификация, предложенная в работе [95]. Эта классификация широко используется при моделировании мезомасштабных процессов [17, 28, 29]. Чтобы подчеркнуть принадлежность систем глубокой конвекции к атмосферным процессам мезомасштаба, их часто определяют как мезомасштабные конвективные системы (МКС) [1, 2]. Ввиду условности разделения атмосферной циркуляции на мелкую и глубокую с отсутствием возможности проведения четкой границы между ними понятие «мезомасштабные конвективные системы» объединяет обе эти системы конвективных течений, т.е. включает широкий спектр форм и масштабов систем мелкой и глубокой конвекции — от конвективных ячеек, линий шквалов, мезомасштабных конвективных комплексов до систем осадков атмосферных фронтов [1, 2, 17].

В большинстве случаев ОЯ генерируются мезомасштабными конвективными системами (МКС) масштаба мезо-α и мезо-β. Одна из наиболее известных классификаций МКС [17] приведена в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Масштаб	Линейные системы	Осесимметричные системы
мезо-α	Линии шквалов	Мезомасштабные конвективные комплек-
		СЫ
мезо-β	Гряды кучево-дождевых облаков	Скопления кучево-дождевых
		облаков

Классификация облачных систем глубокой конвекции

С системами масштаба мезо-α связано большинство случаев конвективных ОЯ, которые могут наблюдаться одновременно на большой территории и фиксироваться сразу несколькими пунктами наблюдательной сети из-за значительных горизонтальных размеров МКС [29]. Системы масштаба мезо-β также генерируют ОЯ, однако эти явления носят локальный характер и зачастую вообще не фиксируются наблюдательной сетью. <u>Мезомасштабные конвективные комплексы (МКК)</u> являются наиболее опасной разновидностью МКС. Они представляют собой долгоживущие (до 10 ч) массивы кучево-дождевых облаков квазиокруглой формы с диаметром более 200 км. Над территорией Пермского края по данным метеорологических спутников (Terra, Aqua, NOAA и др.) ежегодно в среднем выявляется 3 случая возникновения МКК [44], причем в подавляющем большинстве случаев (> 90%) фиксируются явления в градации ОЯ.

<u>Линии шквалов (ЛШ)</u>, в отличие от МКК, достигают в длину 400—500 *км* при сравнительно небольшой ширине. ЛШ также генерируют ОЯ, которые могут фиксироваться сразу несколькими пунктами наблюдательной сети, но сильные ливни для них не характерны.

Ячейковая структура МКС, которая определяется по данным метеорологических радиолокаторов, различна [17, 30]: конвективные системы могут быть как высокоорганизованными, так и состоять из неорганизованного скопления конвективных ячеек, находящихся на разных стадиях развития. От структуры МКС зачастую зависит и характер генерируемых ею опасных явлений. Так, например, МКК может содержать в себе дугообразную долгоживущую систему (ДДС), прохождение которой может сопровождаться сильными шквалами. На рис. 1.1 показан пример ДДС, входящей в состав мезомасштабного конвективного комплекса.

В ряде случаев на правом фланге МКК может быть обнаружен мезоциклон (суперячейка), генерирующий сильные ливни, крупный град, мощные вертикальные порывы ветра и даже смерчи. Пример мезоциклона, входящего в состав мезомасштабного конвективного комплекса, показан на рис 1.2. Неорганизованные МКК, как правило, перемещаются медленно и сопровождаются сильными осадками.



Рис. 1.1. Метеорологические явления в 12 ч 55 мин ВСВ 8 мая 2012 года по данным МРЛ-5 Большое Савино.



Рис. 1.2. Радиолокационная отражаемость на высоте 4—5 км в 16 ч 55 мин ВСВ 21 июня 2012 года по данным МРЛ-5 Большое Савино.

#### 1.2. Физико-статистические параметры неустойчивости

В мире создано множество различных физико-статистических параметров (индексов, предикторов) неустойчивости, в которых конвективные процессы описываются не напрямую, а косвенно [12]. Это означает, что на основе данных о скорости и направлении ветра, влажности и температуры воздуха на опреде-

ленных высотах или изобарических поверхностях рассчитываются характеристики, по которым определяется вероятность возникновения того или иного конвективного явления. Большинство индексов разработано для прогноза наличия или отсутствия грозы как комплекса метеорологических явлений, связанных с развитием кучево-дождевых облаков (например, индекс Вайтинга). Некоторые индексы неустойчивости разработаны для прогноза того или иного конвективного опасного метеорологического явления (ОЯ), когда наличие грозы не обязательно.

Индексы можно классифицировать по характеру входящих в них предикторов [12]. Наиболее целесообразно выделить индексы, основанные на:

- методе частицы;

 – параметрах ветра на различных высотах или изобарических поверхностях;

- температурно-влажностных характеристиках атмосферы;

 комплексе трех первых подходов (комплексные индексы). Зачастую формулы для их расчета включают в себя индексы из первых трех групп.

#### 1.2.1. Индексы, основанные на методе частицы

В основе метода частицы лежат формулы, описывающие сухо- и влажноадиабатические процессы. Температура частицы воздуха при адиабатическом подъеме до уровня конденсации изменяется сначала по сухоадиабатическому закону, а выше уровня конденсации по — влажноадиабатическому [28].

<u>Индекс плавучести</u> (Lifted Index, LI) [98] является одним из основных критериев статической устойчивости атмосферы и определяется как разность между виртуальной температурой изобарической поверхности 500 *гПа* и температурой частицы воздуха единичного объема, поднявшейся в этот слой:

$$LI = T'_{500} - T'_{p,500},$$

где  $T'_{500}$  — виртуальная температура на изобарической поверхности 500 *гПа*, °*C*;  $T'_{p,500}$  — виртуальная температура поднявшейся частицы воздуха, °*C*. При отрицательных значениях индекса стоит ожидать развития гроз, а при значениях от –6 °*C* и ниже стоит ожидать развития конвективных ОЯ.

Индекс LI может рассчитываться для частиц воздуха, поднявшихся от различных изобарических поверхностей, и имеет несколько разновидностей [88]:

– LI, рассчитанный для частицы воздуха, поднявшейся от земной поверхности (Surface Based LI, SB LI).

– LI, рассчитанный для частицы воздуха, поднявшейся от перемешанного слоя (Mixed Layer LI, ML LI). В том слое атмосферы, от которого поднимается частица, усредняются температура и отношение смеси. Чаще всего берется перемешанный слой толщиной 30, 45 и 90 гПа над земной поверхностью. Усреднение необходимо для того, чтобы исключить негативное влияние приземных температуры и влажности.

– LI, рассчитанный для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого перемешанного слоя (Most Unstable Planetary Boundary Layer LI, MU PBL LI). Наиболее неустойчивым слоем называется слой с наибольшей эквивалентно-потенциальной температурой (ЭПТ). Чаще всего выбирается наиболее неустойчивый перемешанный слой толщиной 30 гПа в пределах от земной поверхности до 180 гПа над ней.

– LI, рассчитанный для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя, найденного в пределах от Земной поверхности до изобарической поверхности 700 гПа (lifted stability index of the most unstable layer, SMUL) [119].

Доступная потенциальная энергия неустойчивости (Convective Available Potential Energy, CAPE) [98] представляет собой работу, которую потенциально может совершить частица воздуха при адиабатическом подъеме. При значениях CAPE от 2500 Дж/кг и более стоит ожидать развития конвективных ОЯ. САРЕ рассчитывается по формуле:

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{T'_{p} - T'}{T'} dz,$$

где g — ускорение свободного падения, 9,81  $M/c^2$ ;  $T'_p$  и T' — виртуальная температура окружающей среды и частицы воздуха соответственно, °C; *LFC* уровень свободной конвекции,  $c\Pi a$ ; *EL* — уровень выравнивания температуры,  $c\Pi a$ .

САРЕ, аналогично индексу LI, имеет несколько разновидностей [88]:

– САРЕ, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от земной поверхности (Surface Based CAPE, SB CAPE).

– САРЕ, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от перемешанного слоя (Mixed Layer CAPE, ML CAPE). В том слое атмосферы, от которого поднимается частица, усредняются температура и отношение смеси. Чаще всего берется перемешанный слой толщиной 30, 45 и 90 гПа над земной поверхностью.

– САРЕ, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого перемешанного слоя (Most Unstable Planetary Boundary Layer САРЕ, MU PBL CAPE). Чаще всего выбирается наиболее неустойчивый перемешанный слой толщиной 30 гПа в пределах от земной поверхности до 180 гПа над ней.

– САРЕ, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя (Most Unstable CAPE, MU CAPE). Чаще всего выбирается наиболее неустойчивый слой в пределах от земной поверхности до 255 или 300 *гПа* над ней.

Скорость восходящих потоков UVV, *м/с* можно приближенно оценить по формуле [72]:

$$UVV = \sqrt{2CAPE}$$

Кроме перечисленных видов LI и САРЕ, существуют также и другие их разновидности:

– Showalter Index (LI, рассчитанный для частицы, поднявшейся от изобарической поверхности 850 гПа) [110]. Используется для оценки потенциала для развития глубокой конвекции в средней тропосфере.

– Normalized CAPE (САРЕ, разделенная на толщину конвективнонеустойчивого слоя).

– Downdraft CAPE (потенциальная энергия нисходящих потоков). Используется для прогноза шквалов и нисходящих порывов.

– Low Level CAPE (САРЕ, заключенная в слое толщиной от Земной поверхности до 255 гПа над ней).

Отдельно стоит отметить <u>энергию противодействия конвекции</u> (Convective Inhibition, CIN) [94]:

$$CIN = g \int_{0}^{LFC} \frac{T'_{p} - T'}{T'} dz,$$

где g — ускорение свободного падения,  $M/c^2$ ;  $T'_p$  и T' — виртуальная температура окружающей среды и частицы воздуха соответственно, °C; *LFC* — уровень свободной конвекции,  $c\Pi a$ .

Энергия противодействия конвекции записывается отрицательным числом. Значения CIN < –200 Дж/кг достаточно для прекращения конвекции в атмосфере. CIN имеет разновидности, аналогичные САРЕ. Индекс CIN успешно использовался для разделения случаев возникновения суперячейковых штормов с торнадо и без них на территории США [73].

Малые значения САРЕ в сочетании со значительной энергией противодействия конвекции зачастую свидетельствуют о наличии вышележащего конвективно-неустойчивого слоя [108]. Кроме того, такие значения СІN при наличии динамического фактора (например, прохождения быстродвижущегося холодного фронта) сигнализируют о возможности развития мезомасштабных конвективных систем (МКС), сопровождающихся ОЯ.

# 1.2.2. Индексы, полученные путем расчета параметров ветра на различных высотах или изобарических поверхностях

Эта группа индексов включает в себя скорость и направление ветра на различных высотах, ветровой сдвиг между двумя слоями атмосферы, скорость и направление ведущего потока (средний ветер в слое между изобарическими поверхностями 850 и 500  $r\Pi a$ ), а также вертикальную компоненту скорости ветра на различных изобарических поверхностях.

<u>Сдвиг ветра в нижнем слое</u> (Low level Shear, LLS) [98] предназначен для прогноза линейных МКС (линий шквалов). Сдвиг ветра рассчитывается в слое от земли до 3 *км* (или толщиной 255 *гПа*). При значениях индекса 12 *м/с* и более ожидается возникновение дугообразных долгоживущих систем и линейных скоплений конвективных ячеек.

<u>Глубокий слой сдвига</u> (Deep Layer Shear, DLS) [98] предназначен для прогноза мезоциклонов и высокоорганизованных МКС. Сдвиг ветра, который в данном индексе измеряется в узлах, рассчитывается от земли до высоты 6 *км* (или до изобарической поверхности 450 *гПа*). При значениях индекса 40 *узлов* и более ожидается развитие мезоциклонов.

<u>Относительная завихренность шторма</u> (Storm Relative Helicity, SRH) [99] вычисляется по формуле:

$$SRH = -\int_{0}^{h} \vec{k} (\vec{v}(z) - \vec{c}) \times \frac{d\vec{v}(z)}{dz} dz,$$

где  $\vec{k}$  – вертикальная компонента вектора скорости ветра у земли, m/c;  $\vec{v}(z)$  — горизонтальная составляющая вектора скорости ветра на высоте z, m/c;  $\vec{c}$  — вектор ведущего потока, m/c.

В зависимости от высоты интегрирования *h* индекс SRH может быть применен для разных целей. Если рассчитывать индекс в слое 3 *км* от земли (или толщиной 255 *гПа*), то при его значениях 150  $m^2/c^2$  и более стоит ожидать возникновения штормов с вращением; если рассчитывать индекс до высоты 1 *км* (или толщиной 90 *гПа*), то при его значениях 75  $m^2/c^2$  и более есть условия для возникновения смерчей. Относительная завихренность часто анализируется вместе с САРЕ. В частности, смерчи зачастую образуются при больших значениях завихренности в сочетании с малыми значениями САРЕ [64].

## 1.2.3. Индексы, основанные на расчете температурно-влажностных характеристик атмосферы

<u>Индекс Вайтинга</u> (К Index) [84] рассчитывается по формуле:

$$K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - DD_{700},$$

где  $T_{850}$  и  $T_{500}$  — температура воздуха на изобарических поверхностях 850 гПа и 500 гПа соответственно, °C;  $Td_{850}$  — температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °C;  $DD_{700}$  — дефицит точки росы на изобарической поверхности 700 гПа, °C.

Индекс создан для прогноза внутримассовых гроз. При значениях индекса от 20 и более есть вероятность развития гроз. При значениях индекса 40 и более стоит ожидать развития конвективных ОЯ. Также существует модификация индекса Вайтинга, в которой вместо температуры воздуха и точки росы на изобарической поверхности 850 *гПа* взяты температуры воздуха и точки росы у земли.

<u>Индекс потенциальной неустойчивости</u> (ЕРІ) [88] оценивает стратификацию в средней тропосфере как разность эквивалентно-потенциальной температуры  $\Theta_e$  (°*C*) на изобарических поверхностях 500 и 850 *гПа*:

$$EPI = \Theta_{e,500} - \Theta_{e,850}.$$

Нулевые и отрицательные значения индекса указывают на значительную неустойчивость в средней тропосфере и наличие благоприятных условий для развития систем глубокой конвекции.

<u>Total Totals Index</u> [98] используется для оценки потенциала для развития конвекции в средней тропосфере:

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2T_{500},$$

где  $T_{850}$  и  $T_{500}$  — температура на изобарических поверхностях 850 и 500 гПа соответственно, °C;  $Td_{850}$  — температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °C. При значениях индекса 49 и более стоит ожидать грозы.

<u>Индекс для конвекции с низкой высотой верхней границы облачности</u> (TQ Index) используется также для оценки потенциала развития конвекции в средней тропосфере [90]:

$$TQ = T_{850} + Td_{850} - 1.7T_{700},$$

где  $T_{850}$  и  $T_{700}$  — температура воздуха на изобарических поверхностях 850 гПа и 700 гПа соответственно, °C;  $Td_{850}$  — температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °C. Значения индекса от 12 и более указывают на потенциал для развития термической и вынужденной конвекции, значения от 17 и более указывают на потенциал для развития свободной конвекции.

<u>Индекс Фатеева Н.П.</u> создан в процессе совершенствования индекса Вайтинга [11]:

$$A = T_{850} - T_{500} - \sum_{i=850,700,600,500} DD_i,$$

где  $T_{850}$  и  $T_{500}$  — температура воздуха на изобарических поверхностях 850 гПа и 500 гПа соответственно, °C,  $DD_i$  — дефицит точки росы на изобарической поверхности *i* гПа, °C. Развития глубокой конвекции следует ожидать при положительных значениях индекса.

Кроме указанных индексов, широко применяются Boyden Index (для прогноза зимних гроз), KO Index, Rackliff Index [88] и другие.

#### 1.2.4. Комплексные индексы неустойчивости

Отдельную группу индексов неустойчивости составляют комплексные предикторы, представляющие собой комбинацию перечисленных выше трех подходов для учета сразу нескольких факторов для развития конвекции [12]. С практической точки зрения такой подход является наиболее приемлемым для прогноза МКС, так как для их развития необходимо сочетание неустойчивости атмосферы со сдвигом ветра и различными динамическими факторами.

В России наиболее известен индекс Пескова Б.Е. [11]:

$$U = 0.4 (T^* - T)_{600} - 0.05 (T - Td)_{500} + 0.4 \nabla^2 p - 0.07 |\Delta V|_{\frac{300}{700}},$$

где  $(T^*-T)_{600}$  – отклонение кривой стратификации от кривой состояния на изобарической поверхности 600 гПа (°C),  $(T-Td)_{500}$  — разность температуры и точки росы на изобарической поверхности 500 гПа (°C),  $0.4\nabla^2 p$  — лапласиан приземного давления,  $|\Delta V|_{\frac{300}{700}}$  — модуль разности векторов ветра на изобарических поверхностях 300 и 700 гПа (км/ч). Грозы ожидаются при положительных значениях индекса.

<u>Индекс глубокой конвекции</u> (Deep Convective Index, DCI) [88] объединяет в себе температуру воздуха  $T_{850}$  (°*C*) и точку росы  $Td_{850}$  (°*C*) на изобарической поверхности 850 *гПа* и Surface Based Lifted Index:

$$DCI = T_{850} + Td_{850} - SBLI$$

При значениях DCI 30 и более ожидается развитие конвективных ОЯ. Так как МКС могут возникать при наличии конвективных течений не только от земли, но и от вышележащих слоев атмосферы, целесообразно использовать индекс плавучести для наиболее неустойчивого перемешанного слоя:

$$DCI = T_{850} + Td_{850} - MULI_{PBL,0-180}.$$

Индекс Томпсона (Thompson Index, TI) [113] состоит из композиции К Index и Lifted Index. При тестировании индекса над территорией США была получена связь конвективных ОЯ и значений индекса 40 и более. По аналогии с DCI, для расчета целесообразно использовать MULI:

$$TI = K - MULI_{PBL,0-180}.$$

<u>Комплексный параметр для прогноза мезоциклона</u> (Supercell Composite Parameter, SCP) [113] включает в себя CAPE, DLS и SRH, что позволяет оценивать сразу несколько факторов, необходимых для образования мезоциклона: термическую неустойчивость, ветровой сдвиг и динамический фактор в виде относительной завихренности:

$$SCP = \frac{MUCAPE_{PBL,0-180}}{1000} \frac{SRH_{0-255}}{150} \frac{DLS^2}{60}.$$

Значения индекса от 1 и более указывают на наличие условий для развития мезоциклонов. При значениях индекса 4 и более появляется вероятность того, что вместо мезоциклона может развиться дугообразная долгоживущая система с сильными ветрами.

<u>Индекс мезомасштабных конвективных систем</u> (Mesoscale Convective Systems Index, MCS) [86] также включает в себя несколько разнородных параметров: Lifted Index, сдвиг ветра в нижнем слое и адвекцию тепла  $TA_{700}$ , °C·*м/c* на изобарической поверхности 700 *гПа*:

$$MCS = \frac{MULI_{PBL,0-180} + 4.4}{3.3} + \frac{LLS_{0-255}}{5} + \frac{TA_{700} + 4.5 \times 10^{-5}}{7.3 \times 10^{-5}}$$

При неотрицательных значениях индекса следует ожидать развития МКС.

<u>Индекс угрозы опасной погоды</u> (Severe Weather ThrEAT Index) [94] включает в себя 4 параметра:

$$SWEAT = a + b + c + d$$
.

Параметр а определяется следующим образом:

$$a = 12Td_{850}$$

где  $Td_{850}$  — температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °С.

Параметр *b* характеризует неустойчивость воздушной массы в средней тропосфере:

$$b = 20(TT - 49)$$
,

где *TT* — Total Totals Index:

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2T_{500},$$

где  $T_{850}$  и  $T_{500}$  — температура на изобарических поверхностях 850 и 500 гПа соответственно, °C;  $Td_{850}$  – температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °C.

Параметр b = 0 при TT < 49.

Параметр с характеризует сдвиг ветра:

 $c = 2\vec{v}_{850} - \vec{v}_{500},$ 

где  $\vec{v}_{850}$  и  $\vec{v}_{500}$  — векторы скорости ветра на изобарических поверхностях 850 и 500 гПа соответственно (в узлах).

С помощью параметра *d* можно оценить потенциал для вращательных движений в конвективных облаках:

$$d = 125 (\sin(WD_{500} - WD_{850}) + 0.2),$$

где  $WD_{850}$  и  $WD_{500}$  — направление ветра (в градусах).

Параметр d = 0 при  $WD_{500} - WD_{850} > 0$ .

Таким образом, индекс SWEAT включает в себя 4 различных фактора, благоприятствующих развитию МКС с конвективными ОЯ, которых стоит ожидать при значениях индекса 250 и более. Индекс был разработан Миллером в 1972 г. для прогноза опасной погоды на территории Европы [92, 98] и широко используется в настоящее время.

<u>Вертикальная конвергенция влаги</u> (Vertically Integrated Moisture Flux Convergence, VIMFC) [119] оценивает сходимость потоков в нижней тропосфере; положительные значения индекса свидетельствуют о крупномасштабном подъеме влажного воздуха, благоприятном для развития МКС:

$$VIMFC = \int_{P_0}^{700} \left( \frac{duq}{dx} + \frac{dvq}{dy} \right) \cdot \left( 10^{-5} \frac{\kappa^2}{M \cdot c^2} \right),$$

где  $P_0$  — приземное давление, *гПа*; *и* и *v* — горизонтальные компоненты скорости ветра, *м/с*; *q* — массовая доля водяного пара, *кг/кг*.

VIMFC используется в сочетании с MU LI, который должен быть неотрицателен [119].

Существуют также комплексные индексы прогноза отдельных ОЯ, таких как град, смерчи.

<u>Параметр для сильных смерчей</u> (Significant Tornado Parameter) [113] используется для прогнозирования смерчей категории F2 и выше по шкале Фуджиты-Пирсона. STP включает в себя глубокий слой сдвига, относительную завихренность в слое 0–90 гПа над поверхностью земли, энергию неустойчивости для перемешанного приземного слоя толщиной 90 гПа и уровень конденсации LCL, гПа, для частицы, адиабатически поднявшейся от него:

$$STP = \frac{DLS}{20} \frac{SRH_{0-90}}{100} \frac{MLCAPE_{0-90}}{1000} \frac{2000 - LCL_{ML,0-90}}{1500}$$

Смерчи следует ожидать при значениях индекса от 1 выше. Существует также редакция индекса, основанная на Surface Based CAPE и CIN [103]:

$$STP = \frac{DLS}{20} \frac{SRH_{0-90}}{100} \frac{SBCAPE}{1500} \frac{2000 - LCL_{SB}}{1500} \frac{100 + SBCIN}{150}$$

<u>Энергия завихренности (Energy Helicity Index, EHI)</u> [103] является комплексным параметром прогноза смерчеопасности на основе конвективной неустойчивости и завихренности:

$$EHI = \frac{SBCAPE \cdot SRH_{0-255}}{160000}$$

При значениях индекса, превышающих 1, возможно развитие суперячейковых штормов со смерчами; при достижении значений индекса, превышающих 5, возникает угроза разрушительных смерчей [76, 103]. <u>Параметр для крупного града</u> (Significant Hail Parameter) [113] используется для прогноза града диаметром 2 *см* и более. Параметр определяется по формуле:

$$SHIP = \frac{-MUCAPE_{0-255}q_{MU,0-255}\gamma_{500-700}T_{500}DLS}{44 \cdot 10^{-6}}$$

где  $q_{MU,0-255}$  — массовая доля водяного пара частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя,  $\kappa c/\kappa c$ ;  $\gamma_{500-700}$  — средний градиент температуры между изобарическими поверхностями 500 и 700  $c\Pi a$ , °C,  $T_{500}$  — температура на изобарической поверхности 500  $c\Pi a$ , °C.

<u>Индекс Заводченкова А.Ф.</u> используется для прогноза града, который следует ожидать при положительных значениях [24]:

$$K = 0.17T_{850} + 0.45Td_{850} + 0.05(T_{850} - T_{400}) - 0.58LI - 10.1$$

где  $T_{850}$  и  $T_{400}$  — температура на изобарических поверхностях 850 и 400 гПа соответственно, °*C*;  $Td_{850}$  — температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °*C*, *LI* — lifted index.

#### 1.3. Современные глобальные модели атмосферы

В мире лишь небольшое количество стран развивают и разрабатывают собственные прогностические модели (США, Великобритания, Канада, Франция, Япония, Германия, Австралия, Китай и Россия) [49]. Модели постоянно совершенствуются в результате развития информационных технологий и роста вычислительных мощностей. Современные модели масштабируются уже на десятки тысяч процессорных ядер, а горизонтальное разрешение достигает 10 *км* и менее (табл. 1.3) [116].

#### Характеристики глобальных моделей среднесрочного прогноза погоды

Прогностический цент <u>р</u>	Характеристики модели
ЕСМWF (Европа)	ТСо1279 L137 (~9 км)
Met Office (Великобритания)	17km L70
Météo France (Франция)	TL1198c2.2 L105 (8 км в Западной Европе)
DWD (Германия)	13 km L90 (6.5 км в Европе)
НМС (Россия)	(0.16-0.24)°х0.225° L51 (~20 км в Северном
	полушарии)
NCEP (CIIIA)	Т1534 L64 (~13 км)
Navy/FNMOC/NRL (CIIIA)	T425L60
СМС (Канада)	Yin-Yang (0.14°x0.14°) L120
СРТЕС/INPE (Бразилия)	Т666L64 (~20 км)
ЈМА (Япония)	TL959 L100
СМА (Китай)	GRAPES(0.25,L60)
NCMRWF (Индия)	17km L70
КМА (Корея)	17km L70
ВОМ (Австралия)	12km L70

#### по состоянию на 1 января 2018 года

**Примечание.** Т — спектральная эйлерова модель с квадратичной сеткой; TL — спекральная полулагранжева модель с линейной сеткой; TCo — спектральная полулагранжева модель с кубической сеткой; последующие цифры указывают на количество гармоник. Цифры после буквы L — количество вертикальных уровней.

Основу прогностических моделей составляет программный блок численного решения системы уравнений гидротермодинамики атмосферы [35, 49]. Уравнения атмосферы дополняются описанием атмосферных процессов, не связанных с гидротермодинамикой, а также процессов, имеющих меньший масштаб, чем ячейка сетки модели. Исследования, посвященные росту пространственного разрешения моделей показали, что качество прогноза повышается при увеличении детальности расчетной сетки и совершенствовании параметризаций процессов подсеточного масштаба [49, 87]. Кроме того, при повышении пространственного разрешения появляется возможность перехода от параметризаций к прямому описанию некоторых процессов (в частности, глубокой конвекции) [48, 49]. При повышении пространственного разрешения возникает проблема неоднородности пространственного разрешения по широте и долготе на традиционной широтно-долготной расчетной сетке вследствие сходимости меридианов к полюсам. Для решения этой проблемы разработаны различные альтернативные сетки [48]: редуцированная широтно-долготная сетка, икосаэдральные треугольные и шестиугольные сетки, проекция куба на сферу, сетка Инь-Янь и другие. Помимо устранения неоднородности пространственного разрешения, такие сетки также решают проблему перерасхода вычислительных ресурсов на расчет «лишних» точек сетки [48, 49].

Пространственного разрешения современных глобальных моделей все еще недостаточно для непосредственного описания конвективных течений. Поэтому для прогнозирования конвективных явлений прибегают к процедурам параметризации, либо по выходным данным этих моделей рассчитывают индексы неустойчивости. Кроме того, в системах постобработки данных счета глобальных моделей зачастую рассчитываются некоторые индексы неустойчивости (САРЕ, CIN, LI, K, SRH и др.).

Несмотря на доступность выходных данных прогностических моделей, индексы неустойчивости чаще используются совместно с данными мезомасштабных моделей. Тем не менее, расчет этих индексов на данных глобальных прогностических моделей представляет большой интерес, так как модели постоянно совершенствуются. При отказе от параметризации конвекции в пользу непосредственного моделирования конвективных течений применение индексов неустойчивости становится нецелесообразным.

<u>Модель ECMWF</u> разработана в Европейском Центре Среднесрочных прогнозов погоды и является мировым лидером среди среднесрочных моделей [48, 87]. Модель использует кубическую сетку с горизонтальным разрешением около 9 *км* и вертикальным разрешением в 137 уровней. Выходные данные счета модели отсутствуют в открытом доступе, за исключением отдельных параметров (атмосферное давление, приведенное к уровню моря, температура и

ветер на изобарической поверхности 850 гПа, а также высота изобарической поверхности 500 гПа).

Модель ECMWF задействована для прогноза гроз с применением индексов неустойчивости, которые рассчитывались на выходных данных модели [70]. Оценка качества прогноза производилась по данным спутников, грозопеленгаторов и пунктов наблюдательной сети.

Модель ECMWF используется для создания реанализа ERA5 [78]. В настоящее время архив данных ERA5 находится в стадии наполнения (до конца 2019 года должны быть доступны данные с 1950 г.). Данные ERA5 находятся в свободном доступе в сети интернет с горизонтальным разрешением 0,25°.

<u>Модель GFS</u> (Global Forecast System) разработана в NCEP (National Centers for Environmental Prediction), США. Модель использует редуцированную широтно-долготную сетку с горизонтальным разрешением около 13 км [116]. Прогноз рассчитывается на срок 16 суток, формат выходных данных — GRIB-2. Расчет прогноза осуществляется 4 раза в сутки. Файлы счета модели доступны с разрешением 0,25, 0,5, 1 и 2,5° и шагом по времени 1 ч. Кроме того, отдельные параметры (например, температура воздуха на высоте 2 м над землей, количество и интенсивность выпавших осадков и т.д.) передаются на сетке с разрешением около 13 км. Стоит отметить, что в открытом доступе размещены архив прогнозов за последние 2 года и данные объективного анализа с 2007 года по настоящее время.

Глобальная модель GFS используется для прогноза конвекции в Экваториальных районах Южной Америки. В рамках работы [83] был получен новый комплексный индекс неустойчивости, внедренный в оперативную практику в NCEP. Модель GFS также была применена для анализа случая развития конвекции в Тегеране с привлечением синоптических карт, глобальных и мезомасштабных моделей [111].

Также в NCEP разработана глобальная климатическая <u>модель CFS</u> (Climate Forecast System). Данная модель интересна тем, что в открытом доступе имеет-

ся архив счета и данные реанализа с 1979 года. Данные реанализа имеют горизонтальное разрешение 0,5, 1 и 2,5° и доступны с шагом по времени 1 ч. Кроме того, отдельные параметры передаются на сетке с разрешением около 20 км (до 2011 года — на сетке с разрешением около 37 км). Формат выходных данных — GRIB-2.

<u>Модель GEM</u> (Global Environment Multiscale) разработана в СМС (Canadian Meteorological Center), Канада. Модель использует расчетную сетку Yin-Yang [102] с разрешением около 15 *км* по горизонтали [116]. Прогноз рассчитывается на 10 суток, формат выходных данных — GRIB-2. Расчет прогноза осуществляется два раза в сутки. Файлы счета модели доступны с разрешением 0,24 и 0,6° и с шагом по времени 3 *ч*.

<u>Модель ПЛАВ</u> (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютного Вихря) разработана в Институте Вычислительной Математики РАН и применяется в Гидрометцентре России в качестве оперативной. Модель использует широтно-долготную сетку с горизонтальным разрешением в Северном полушарии по широте и долготе 0,18°×0,225° [49, 115]. Прогноз рассчитывается на срок 10 суток, формат выходных данных — GRIB-1. Расчет прогноза осуществляется 2 раза в сутки. Данные счета модели автоматически поступают на ftp-сервер Пермского государственного национального исследовательского университета.

<u>Модель ICON</u> (ICOsahedral Non-hydrostatic) разработана в DWD (Deutscher WetterDienst). Модель использует треугольную икосаэдральную сетку с горизонтальным разрешением около 13 *км* (над Европой 6,5 *км*) [116, 118]. Расчет прогноза осуществляется на срок 180 часов 4 раза в сутки. Файлы счета модели доступны с разрешением 13 *км* (над Европой с разрешением 6,5 *км*) и шагом по времени 1 *ч*. Формат выходных данных — GRIB-2 с нерегулярной сеткой.

Модель GSM (Global Spectral Model) разработана в JMA (Japan Meteorological Agency). Модель использует широтно-долготную сетку с горизонтальным разрешением около 20 *км* [116]. Расчет прогноза осуществляется на срок 10 суток 4 раза в сутки. Преимуществом является доступность данных счета модели с 2007 года с пространственным разрешением 0,5° и шагом по времени 6 ч. Формат выходных данных — GRIB-2.

#### 1.4. Современные мезомасштабные модели атмосферы

Негидростатические мезомасштабные модели разработаны во многих странах. Наиболее известной является модель WRF (Weather Research Forecasting), разработанная Национальным центром атмосферных исследований США (NCAR) совместно с университетом Пенсильвании [106]. Исходный код модели WRF находится в открытом доступе и может быть собран без ограничений различными компиляторами (Intel, GCC, PGI) для различных платформ, таких как высокопроизводительные вычислительные кластеры (суперкомпьютеры) и персональные компьютеры.

Программный комплекс модели WRF состоит из нескольких основных блоков: препроцессинга (WPS), инициализации, динамического ядра (WRF или NMM с наборами процедур параметризаций процессов подсеточного масштаба) и постпроцессинга (UPP или ARWPost) [15, 106].

В состав модуля WPS входят утилиты ungrib (осуществляет перевод данных глобальных моделей из кода GRIB-1,2 в NetCDF), geogrid (интерполирует рельеф, почвенные характеристики, водоемы на выбранную вычислительную сетку) и metgrid (создает начальные и граничные условия для запуска модели в формате NetCDF). Инициализация модели WRF производится в программах real (для динамического ядра ARW) и real\_nmm (для динамического ядра NMM). В этой программе производится вертикальная интерполяция начальных данных в орографические координаты модели и формируются граничные условия на срок прогноза по данным материнской модели [15]. На этой стадии может быть подключен блок четырехмерного вариационного усвоения данных

спутниковых и радиолокационных наблюдений, а также данных наблюдательной сети (WRF-DA).

Модель WRF выпускается с двумя динамическими ядрами — NMM (Non-Hydrostatic Mesoscale Model) и ARW. Ядра NMM и ARW используют различные численные методы для решения системы дифференциальных уравнений. Ядро NMM способно работать с меньшим количеством типов сеток и меньшим набором параметризаций подсеточных процессов. В настоящее время модели WRF-ARW и WRF-NMM представляют собой по существу отдельные прогностические системы, требующие самостоятельной процедуры установки, хотя в них имеется достаточно много общих элементов [14, 15].

Динамические ядра ARW и NMM отличаются типами систем прогностических уравнений и методами их численного решения. В частности, динамическое ядро NMM решает систему, в которой отделены члены, присутствующие в гидростатических моделях, от слагаемых, возникающих вследствие учета негидростатичности [15]. Кроме того, модели ARW и NMM отличаются типами используемых вычислительных сеток. Стоит также отметить прогностическую систему NEMS-NMMB, основанную на динамическом ядре NMM и предназначенную для моделирования атмосферы над всей территорией Земного шара.

Модуль постпроцессинга используется для обработки результатов моделирования и расчета некоторых дополнительных переменных (в том числе, индексов неустойчивости). Для модели WRF существует два различных модуля постпроцессинга, которые являются по сути самостоятельными программными продуктами: ARWPost (только для динамического ядра ARW) и UPP (Unified Post-Processor). ARWPost в настоящее время является устаревшим программным продуктом. UPP может проводить постобработку не только результатов расчетов модели WRF с динамическими ядрами ARW и NMM, но и результатов расчетов динамического ядра NMMB.

Кроме модели WRF стоит также упомянуть мезомасштабную негидростатическую модель COSMO (the Consortium for Small-scale Modelling) [19], кото-

рая развивается и поддерживается одноименным Европейским консорциумом по мезомасштабному моделированию. В консорциум входят метеослужбы Германии, Италии, России, Греции, Румынии и других Европейских государств. В качестве начальных и граничных условий модель использует данные оперативного прогноза глобальной модели DWD-ICON, а также ECMWF и других моделей. Также в модели предусмотрено усвоение данных наземных и радиолокационных наблюдений. В модели используется сдвинутая сферическая система координат, в которой в качестве полюса выбирается такая точка, что экватор проходит через центральную часть области интегрирования. Благодаря этому расстояния между ближайшими узлами примерно постоянно для всей области интегрирования [45].

Мезомасштабные прогностические модели широко используется на территории России и сопредельных государств.

В Гидрометцентре России используются различные мезомасштабные прогностические модели: WRF-ARW с горизонтальным разрешением от 3 до 20 *км* [15, 22], а также COSMO-Ru с горизонтальным разрешением от 2.2 *км* до 7 *км* над Европейской Россией и 14 *км* над территорией Западной Сибири [45].

В работе [22] авторами предложен новый индекс неустойчивости, учитывающий распределение вертикальной компоненты скорости ветра в тропосфере. Данный индекс рассчитывается на выходных данных модели WRF-ARW с пространственным разрешением 18 *км*.

В республике Беларусь используется WRF-ARW с горизонтальным разрешением основной сетки 15 *км* и разрешением вложенной сетки 3 *км* [33]. Стоит отметить, что для республики Беларусь был разработан собственный набор геоданных для программы geogrid с горизонтальным разрешением 3''.

В работе [52] модель WRF-ARW с горизонтальным шагом сетки 10 км применяется в системе автоматического предупреждения возможных происшествий, связанных с обильными осадками и подтоплениями. Также в оперативном режиме WRF-ARW с горизонтальным разрешением от 10 до 20 км приме-
няется на территории Дальнего Востока [46], Северного Кавказа [10], Сибири [34]. На Дальнем Востоке также эксплуатируется модель WRF-NMM, предназначенная для прогноза тропических циклонов [32].

Также мезомасштабные модели на территории России применяются для прогноза ОЯ конвективного происхождения [23, 27, 34]. Стоит отметить, что в большинстве случаев авторы отечественных исследований не прибегают к непосредственному моделированию конвективных течений, ограничиваясь процедурами параметризации.

В зарубежных работах непосредственное моделирование конвекции встречается чаще [63, 73, 94]. Зачастую моделирование касается не только конвективных ОЯ, но и мезомасштабных конвективных систем, с которыми они связаны. Для непосредственного моделирования конвекции используется не только модель WRF, но и другие мезомасштабные модели, например, CMC-HRDPS (Канада) [68, 97], расчетная область которой покрывает всю территорию Канады с горизонтальным разрешением 2.5 *км*.

Для валидации результатов моделирования мезомасштабных систем глубокой конвекции существует объектно-ориентированный подход [72], который предполагает сопоставление фактического (определяемого по данным спутниковых наблюдений и МРЛ) и прогностического положения МКС и зон опасных явлений погоды. В работе [14] представлена его модификация, в которой критериями оценивания являются расстояние между центрами тяжести объектов по фактическим данным и по результатам моделирования, а также максимальные значения оцениваемых переменных (температура и высота верхней границы облачности (ВГО), интенсивность осадков, скорость шквала). В отличие от точечного оценивания по данным метеостанций, данный метод позволяет разделить ошибку прогноза на две составляющие: ошибку в амплитуде (интенсивности) и в положении объекта. Последняя обусловлена, главным образом, начальными условиями, поэтому ее устранение крайне затруднительно и воз-

можно лишь по мере совершенствования глобальных моделей прогноза погоды [14].

В последние десятилетия в странах, где смерчи наблюдаются часто и наносят значительный ущерб, ведутся исследования возможностей их прогнозирования с помощью мезомасштабных моделей атмосферы [69, 112, 117]. Модель WRF в диагностическом и прогностическом режиме применяется для моделирования условий возникновения торнадо, а также формирования и эволюции мезомасштабных систем глубокой конвекции, генерирующих смерчи. В отдельных работах также приведены примеры успешного воспроизведения длины пути смерчей [69] и их интенсивности [117].

Модель WRF-NMM была использована для исследования условий формирования смерчей на территории Индии в 2007 и 2009 гг. [94]. Модель запускалась с шагом сетки 3 и 4 *км* на срок 24 *ч*. Авторы показали, что модель успешно воспроизводит сильную конвективную неустойчивость в зоне формирования смерча, а также развитие мезомасштабной конвективной системы, в которой возникает смерч. Верификация результатов моделирования выполнялась на основе данных допплеровского радиолокатора и спутниковых наблюдений.

В работе [96] модель WRF применялась в диагностическом режиме для изучения влияния горного рельефа на формирование смерчей на территории Греции. В качестве начальных условий использовались данные реанализа

ECMWF. Численные эксперименты проводились в различных режимах — с учетом фактического рельефа и без учета рельефа. Было показано, что в большинстве случаев сложный рельеф играет значительную роль при формировании смерчей на исследуемой территории.

В работе [80] был проведен эксперимент по усвоению данных сети грозепеленгаторов в модели WRF на примере случая возникновения сильных смерчей в Оклахоме 24.05.2011 г. При усвоении данных была реализована функция инициирования глубокой конвекции в модели методом локального увеличения отношения смеси водяного пара в местах фиксации грозовых разрядов. Было показано, что усвоение данных грозопеленгации за несколько часов до времени возникновения смерчей позволило значительно повысить качество прогноза.

В работе [69] представлен трехуровневый алгоритм прогноза длины пути смерчей, основанный на идентификации конвективных штормов с вращением (maximum updraft helicity) по данным модели WRF с пространственным разрешением 4 *км* для территории США. В весенний период коэффициент корреляции между длиной пути смерча и протяженностью пути мезоциклона по модели достигал 0,91, а в летний период он оказался существенно меньше.

В работе [107] была применена модель WRF для разделения комплексов конвективных штормов со смерчами и без них (tornadic and nontornadic outbreaks). Исследование проводилось на основе выборки из 100 случаев конвективных штормов, из которых в половине случаев наблюдались торнадо. В результате были выявлены 4 предиктора, которые являются определяющими для разделения случаев конвективных штормов со смерчами и без них — это storm relative helicity, low-level shear, deep level shear и lifted condensation level, а также синоптические параметры, такие как geopotential height and sea level pressure. В то же время термодинамические индексы неустойчивости не позволяют разделить конвективные шторма на отдельные типы.

Использование системы нескольких вложенных сеток, а также технологии вариационного усвоения данных доплеровских радиолокаторов в современных

мезомасштабных моделях атмосферы позволяют получать прогнозы с очень высоким пространственным разрешением. Таким образом, удается воспроизвести формирование не только мезомасштабных конвективных систем с мезоциклонами, но и самих смерчей. Например, в работе [117] описаны результаты моделирования смерчей в Оклахоме в мае 2011 г. с помощью модели WRF с системой усвоения радиолокационных данных ARPS. Модель запускалась на 4-х вложенных сетках с шагом 9 и 1 км, 100 и 50 м. Интенсивность смерчей по модели оказалась несколько ниже, чем по фактическим данным, а их траектория была смещена относительно фактического положения на 8 км. Однако в целом результаты моделирования оказались достаточно реалистичными и позволили воспроизвести основные особенности развития смерчей.

Модель WRF также применялась для изучения условий возникновения отдельных случаев смерчей в России, которые наблюдались в густонаселенных районах и нанесли существенный ущерб. На основе выходных данных модели рассчитывались параметры конвективной неустойчивости атмосферы при возникновении смерчей в 2013 г. в Обнинске и в 2014 г. в Предуралье [100]. В работах [23, 57, 58] описаны численные эксперименты с моделью WRF с целью воспроизведения возникновения и перемещения мезомасштабных конвективных систем. На примере случаев сильного шквала и смерча в Башкирии в 2007 и 2014 гг. было показано, что оценка места и времени возникновения смерча по модели WRF сопровождается значительными ошибками.

В России также разрабатываются специализированные мезомасштабные модели атмосферы для решения таких задач, как моделирование переноса примесей в атмосфере [4, 54, 55] и воспроизведение конвективной облачности в полярных районах [3].

### 1.5. Выводы по главе 1

1. Развитие мезомасштабных конвективных систем сопровождается опасными метеорологическими явлениями, поэтому вместо совершенствования прогноза конвективных ОЯ целесообразно совершенствование прогноза пространственного и временного положения МКС.

2. Развитие современных глобальных гидродинамических моделей, в частности, рост их пространственного разрешения позволяет прогнозировать ОЯ конвективного происхождения с помощью расчетов индексов неустойчивости атмосферы. Наличие модели отечественной разработки, адаптированной для территории России, позволит повысить качество прогноза конвективных ОЯ.

3. В мире создано большое количество индексов неустойчивости, предназначенных для прогноза конвективных ОЯ. Их разнообразие позволяет подобрать наиболее оптимальные из них для прогноза конвективных ОЯ на территории Урала.

4. Зарубежный опыт прогнозирования МКС и связанных с ними ОЯ мезомасштабными прогностическими моделями подтверждает необходимость подобных исследований на территории Урала. Предпочтителен отказ от параметризации глубокой конвекции в пользу прямого моделирования конвективных течений.

### 2. ПРОГНОЗ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ КОНВЕКТИВНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ

### 2.1. База данных опасных метеорологических явлений Пермского края

В 2014 г. была разработана оперативно обновляющаяся webкартографическая база данных об опасных метеорологических явлениях (ОЯ) на территории Пермского края, наблюдавшихся с 1991 г. по настоящее время [56]. Целью разработки являлось структурирование информации о произошедших ОЯ для возможности анализа условий их возникновения и ведения статистики. База данных об опасных явлениях погоды опубликована в свободном доступе в сети Internet [7].

Созданная база данных является улучшенным региональным аналогом базы данных об опасных явлениях погоды на территории Европы (ESWD, European Severe Weather Database) [79]. ESWD была создана Европейской лабораторией по исследованию сильных конвективных штормов (ESSL) для объединения информации об ОЯ, поступающей из разных источников. В базе данных ESWD представлены сведения об опасных явлениях погоды, полученные с помощью наблюдательной сети, свидетельств очевидцев и СМИ.

Обновление информации в базе данных ESWD по регионам восточной части Европейской России ведется нерегулярно. Кроме того, критерии для занесения явления в базу ESWD не соответствуют критериям опасных явлений, установленным в России. В связи с этим возникает необходимость создания региональных аналогов базы данных ESWD для территории России.

База данных объединила несколько разнородных массивов данных об опасных явлениях погоды (данные сети метеостанций и гидропостов, данные

об опасных явлениях, не зафиксированных наблюдательной сетью, но нанесших значительный материальный ущерб, данные очевидцев и СМИ, данные метеорологических радиолокаторов МРЛ-5 и ДМРЛ-С, данные космического мониторинга) [56].

Станционные данные об опасных явлениях погоды, зафиксированных на территории Пермского края, формируются на основе наблюдательной сети Пермского ЦГМС. В настоящее время наблюдения ведутся на 25 метеостанциях [43]. Для сбора станционных данных об опасных метеорологических явлениях были использованы результаты статистической обработки наблюдений, опубликованные в Метеорологических ежемесячниках, где приводятся сведения об опасных явлениях, наблюдавшихся на метеостанциях и постах. Характеристика ОЯ включает пункт наблюдения, дату и время фиксации явления, продолжительность явления.

Данные об опасных явлениях, не зафиксированных наблюдательной сетью, но нанесших социально-экономический ущерб, получены из двух источников: базы данных ВНИИГМИ-МЦД, а также ежемесячных обзоров, опубликованных в журнале «Метеорология и гидрология».

Данные непосредственных наблюдений очевидцев опасных явлений погоды являются наименее надежным источником информации об ОЯ. Однако роль этого источника в последнее время значительно возросла, благодаря видеофиксации фактов наблюдения ОЯ и/или нанесенного ущерба. При проверке подобных фактов были использованы данные метеорологического радиолокатора или метеорологических спутников (NOAA, Terra, Aqua), что позволяло подтвердить возможность развития опасного явления погоды в данном месте в данное время.

Кроме перечисленных способов фиксации опасных явлений погоды, использовались и оригинальные методы, основанные на данных космического мониторинга. Так, небольшое число случаев опасных конвективных явлений (сильные шквалы и смерчи) было выявлено и подтверждено по данным о вет-

ровалах в лесных массивах [56, 59, 60]. Объективным и надежным источником информации о ветровалах являются космические снимки среднего и высокого разрешения со спутников серий LANDSAT, SENTINEL и SPOT.

База данных создана с использованием технологии ArcSDE, предоставляющей возможность многопользовательского редактирования информации.

Все занесенные в базу данных случаи опасных явлений погоды имеют пространственную привязку. Ее основой является точечный класс пространственных объектов — мест наблюдений ОЯ. Всего выделяется 4 типа мест наблюдений: метеостанция, гидрологический пост, авиационная метеорологическая станция гражданская (АМСГ) и произвольная точка наблюдений, на которой режимные наблюдения не осуществляются.

Для публикации геопространственных данных и их анализа используется ГИС-сервер ArcGIS for Server 10.3. На сервере AcrGIS запущен картографический сервис для визуализации геопространственных данных и сервис печати, позволяющий строить обзорную карту места регистрации опасного явления. Отображение картографической информации в web-браузере происходит с применением мультимедиа-технологии HTML5, а интерактивность интерфейса достигается при помощи ArcGIS API for JavaScript. Использование технологии HTML5 позволяет добиться корректного отображения интерактивной карты во всех браузерах без установки для них дополнительных модулей.

Для заполнения базы данных разработано настольное приложение-клиент для операционных систем семейства Windows. Приложение разработано на языке C#.NET 2012 для платформы .NET 4.5.

По каждому случаю опасного явления, занесенному в базу данных, приведены характеристики, которые перечислены в табл. 2.1.

Структура атрибутивных данных об опасных явлениях погоды

Наименование	Тип и	Описание данных или допустимые
поля	размерность	значения
	поля	
Идентификатор	Integer	Уникальный идентификатор
Место регистрации	Text, 100	Название метеостанции, гидропоста или произ-
		вольной области, где
		зафиксировано ОЯ
Тип регистрации	Text, 50	– По данным наблюдательной сети;
		– По данным обследований МЧС и ЦГМС;
		– По данным очевидцев или СМИ;
		– По данным космической съемки
		(ветровалы)
Тип явления	Text, 50	– Сильный мороз;
		– Сильная жара;
		– Очень сильный ветер;
		– Сильная метель;
		– Сильный туман;
		– Очень сильный дождь;
		– Сильный ливень;
		– Продолжительный дождь;
		– Очень сильный снег;
		– Сильные смешанные осадки;
		– Сильное гололедно-изморозевое
		отложение;
		– Шквал;
		– Крупный град;
		– Смерч
Интенсивность	Float	Интенсивность явления с указанием единицы из-
явления		мерения
Дата	Date/Time	Дата явления
Продолжительность	Integer	Продолжительность явления (в минутах, часах
явления		или сутках)
Синоптическая	Text, 500	Краткое описание синоптической
ситуация		ситуации
Гиперссылка	Text, 300	Ссылка на более подробное описание явления на
		сайте «Опасные природные явления Пермского
		края»
Описание ущерба	Text, 500	Краткое описание нанесенного ущерба
Комментарий	Text, 500	Дополнительные данные об ОЯ

Для конвективных ОЯ в базе предусмотрены дополнительные поля, которые заполняются по данным метеорологических радиолокаторов (табл. 2.2).

Структура дополнительных атрибутивных данных для конвективных ОЯ

Наименование	Тип и	Описание данных или допустимые
поля	размерность	значения
	поля	
Высота верхней гра-	Integer	Высота верхней границы облаков по
ницы облаков		данным метеорологического
(км, радар)		радиолокатора, км
Скорость шквала	Integer	Скорость шквала по данным метеорологическо-
( <i>м/с</i> , радар)		го радиолокатора, м/с
Явления погоды	Text, 30	Метеоявления по данным метеорологического
(радар)		радиолокатора
Тип конвективной	Text, 30	<ul> <li>Мезомасштабный конвективный</li> </ul>
системы		комплекс;
		– Линия шквалов;
		<ul> <li>– Линейная система масштаба мезо-β;</li> </ul>
		– Скопление масштаба мезо-β



Рис. 2.1. Схема базы данных «Опасные метеорологические явления Пермского края».

Кроме основных данных об ОЯ в базе хранятся дополнительные данные в виде изображений (карты реанализа, кольцевые карты, фотографии очевидцев, снимки с экранов метеорологических радиолокаторов, спутниковые снимки Terra, Aqua, NOAA и снимки высокого разрешения для идентификации ветровалов). Физически изображения хранятся на различных ресурсах. В базу заносятся лишь гиперссылки на них.

Физически база данных хранится в СУБД в виде связанных таблиц, схема которых (диаграмма базы данных) показана на рис. 2.1.

Таблица Observation хранит данные об объектах наблюдательной сети, включая пространственную привязку (поле shape), таблица Accident хранит данные об OЯ, а таблица Pictures хранит данные о графической информации об OЯ. Все остальные таблицы являются справочниками, так как предназначены для организации перечисляемого типа данных.

Также разработан инструмент вывода дополнительной информации о пункте наблюдений, включая статистику числа случаев опасных явлений погоды по метеостанциям Пермского края. При осуществлении соответствующего запроса пользователь получает доступ к следующим характеристикам метеостанции:

– Название, географические координаты и высота расположения пунктов наблюдений (метеостанций или гидропостов);

Обзорная карта расположения пункта наблюдений масштаба 1:200000;

– Год начала наблюдений, состояние (действует/не действует);

 Данные о климатических экстремумах в пункте за весь период наблюдений (абсолютные минимум и максимум температуры воздуха, суточный максимум осадков, максимальная зарегистрированная скорость ветра, максимальная высота снежного покрова);

 – Распределение числа случаев опасных явлений по типам (за период с
 2001 г. по настоящее время), которое визуализируется в виде круговой диаграммы;

 – Распределение числа случаев опасных явлений по годам (за период с 2001 г. по настоящее время), которое визуализируется в виде столбчатой диаграммы.

Разработанная база данных опубликована в открытом доступе вместе с web-интерфейсом поиска ОЯ по характеристикам и обновляется в оперативном режиме.

### 2.2. Система получения модельных данных

Для получения модельных данных и их автоматической обработки были разработаны сценарии (скрипты) для операционной системы (OC) Linux. Работоспособность сценариев проверялась в операционных системах семейства Red Hat (Fedora 22-27 и CentOS 6-7) на базе ядра Linux. Выбор данной OC обусловлен тем, что в ее репозиториях имеются все необходимые дополнительные утилиты и программы, которые не требуют компиляции. В качестве интерпретатора командной оболочки (языка сценариев) был выбран bash (Bourne again shell). Язык сценариев обладает мощным синтаксисом, позволяющим разрабатывать сценарии, схожие с функционалом консольных приложений.

В сценариях для Linux использовались следующие приложения и утилиты:

- Wget утилита для получения файлов из сети Internet;
- get\_grib.pl и get\_inv.pl сценарии на языке perl для частичной загрузки файлов в коде GRIB;
- g2ctl.pl и grib2ctl.pl сценарии на языке perl для формирования заголовочного файла для OpenGrADS;
- Программа OpenGrADS и утилита gribmap из программного комплекса OpenGrADS.

Консольная утилита Wget предназначена для загрузки файлов и webстраниц из сети Internet по протоколам HTTP, HTTPS и FTP. В большинстве случаев используется в случае необходимости многократной загрузки файлов по определенному алгоритму тогда, когда их загрузка вручную нецелесообразна.

Сценарии get\_grib.pl и get\_inv.pl разработаны в NCEP для возможности частичной загрузки файлов в коде GRIB. С их помощью возможно получение только части переменных, хранящихся в GRIB-файлах при помощи индексных файлов (рис. 2.2)

> 130:55991292:d=2016052100:HGT:400 mb:7 hour fcst: 131:56686919:d=2016052100:TMP:400 mb:7 hour fcst: 132:57008559:d=2016052100:RH:400 mb:7 hour fcst: 133:57709166:d=2016052100:VVEL:400 mb:7 hour fcst: 134:58690381:d=2016052100:UGRD:400 mb:7 hour fcst: 135:59433021:d=2016052100:VGRD:400 mb:7 hour fcst: 136:59863023:d=2016052100:ABSV:400 mb:7 hour fcst: 137:60446549:d=2016052100:CLWMR:400 mb:7 hour fcst 138:60664447:d=2016052100:ICSEV:400 mb:7 hour fcst 139:60785347:d=2016052100:03MR:400 mb:7 hour fcst: 140:61807623:d=2016052100:HGT:450 mb:7 hour fcst: 141:62499063:d=2016052100:TMP:450 mb:7 hour fcst: 142:62823627:d=2016052100:RH:450 mb:7 hour fcst: 143:63522415:d=2016052100:VVEL:450 mb:7 hour fcst: 144:64538529:d=2016052100:UGRD:450 mb:7 hour fcst: 145:65268921:d=2016052100:VGRD:450 mb:7 hour fcst:

Рис. 2.2. Пример фрагмента индексного файла.

В индексном файле хранится информация о переменных, находящихся в GRIB-файле, в том числе, номер байта, с которого она начинается. Технология получения необходимых переменных из GRIB-файлов выглядит следующим образом: утилита get\_inv.pl получает наименования необходимых переменных и позиции их начала в исходном GRIB-файле, передает их утилите get\_grib.pl, которая загружает выбранные фрагменты GRIB-файла и объединяет их в один. С помощью данных утилит можно добиться экономии Internet-траффика и ускорения получения файлов прогноза.

Кроме того, в NCEP был разработан оперативный сервис GRIB-filter [99]. Он предназначен для получения оперативных данных прогностических моделей в коде GRIB-2 с возможностью загрузки не только отдельных переменных,

но и ограничения данных по пространству. Данный сервис также позволяет добиться значительной экономии Internet-траффика и значительного ускорения получения файлов прогноза. GRIB-filter в настоящее время поддерживает загрузку выходных данных глобальных моделей GFS и CFS, ансамблевых прогнозов NCEP и Канадской метеослужбы.

Сценарии g2ctl.pl и grib2ctl.pl разработаны в NCEP для создания заголовочного файла, предназначенного для приложений, входящих в состав программного комплекса OpenGrADS. Заголовочный файл содержит список всех переменных, находящихся в GRIB-файле, а также информацию о пространственном и временном разрешении.

Программный комплекс OpenGrADS предназначен для визуализации метеорологических данных в кодах GRIB, DODS, NetCDF и др. Программный комплекс позволяет визуализировать метеоданные в различных форматах: графическом (PNG, PDF, JPEG, BMP и др.), геопространственном (векторные и растровые файлы для чтения в геоинформационных системах) и текстовом [101]. OpenGrADS обладает возможностью автоматизировать визуализацию метеоданных посредством языка сценариев с мощным математическим аппаратом. Утилита gribmap из состава OpenGrADS создает индексный файл с номерами байтов для каждой переменной в GRIB-файле.

Таким образом, система получения модельных данных выполняет следующие действия: 1) загружает данные глобальных моделей; 2) формирует заголовочный файл для OpenGrADS и индексирует загруженные GRIB-файлы; 3) автоматически визуализирует метеоданные, в том числе индексы неустойчивости.

Система получения модельных данных используется также Метеосервисом предоставления прогнозов прогностических моделей [39] для загрузки выходных данных прогноза глобальных моделей СМС-GEM и NCEP-GFS, ансамблевых моделей NAEFS и NCEP-GEFS, а также климатической модели CFS. Метеосервис предоставляет прогноз по географическим координатам в виде таб-

лицы, в ячейках которой содержатся значения метеорологических элементов (в том числе, индексов неустойчивости атмосферы). Для удобства получения прогноза был разработан web-интерфейс, который предоставляет доступ к прогностическим данным с оперативной карты. Метеосервис разработан на языках JavaScript и PHP. Для извлечения прогностических данных на сервере используется утилита wgrib.

### 2.3. Реализация расчета индексов неустойчивости в OpenGrADS

OpenGrADS обладает встроенным языком для написания сценариев, позволяющим значительно расширять его функциональные возможности. Кроме того, язык сценариев обладает мощным математическим аппаратом, что позволяет рассчитывать сложные физические величины [101].

Например, расчет VIMFC производится при помощи встроенных функций вертикального интеграла и дивергенции:

'define ps = PRESsfc/100'

'define qu = vint(ps,SPFHprs\*UGRDprs,700)'

```
'define qv = vint(ps,SPFHprs*VGRDprs,700)'
```

'define vimfc = -1e5\*hdivg(qu,qv)'

В расчете индекса MCS сложность представляет вычисление адвекции тепла в средней тропосфере. Для этого используются функции shear (вычисление сдвига ветра) и cdiff (вычисление смещения какого-либо параметра по осям x и y):

'define shear03 = shear(u10m,v10m,u700,v700)' 'define dtr = 3.14159265359/180' 'define t7 = tmp700' 'define u7 = u700' 'define v7 = v700' 'define dtx = cdiff(t7,x)' 'define dty = cdiff(t7,y)' 'define dx = cdiff(lon,x)\*dtr' 'define dy = cdiff(lat,y)\*dtr' 'define ta7 = -1\*((u7\*dtx)/(cos(lat\*dtr)\*dx)+v7\*dty/dy)/6.37e6' 'define mcs = (shear03-11.5)/5+(ta7-0.000045)/0.000073-(bli+4.4)/3.3'

Вычисление адвекции позволяет также визуализировать фронтальные зоны на картах, при этом в качестве параметра, адвекцию которого необходимо вычислить, используется эквивалентно-потенциальная температура на изобарической поверхности 850 гПа.

Значительную сложность представляет реализация расчета температуры поднимающейся частицы (для индексов LI и CAPE) [28]. Расчет этих величин оформлен в виде подпрограмм-функций. Алгоритм GAMMA-W вычисления LI и CAPE находится в открытом доступе и реализован на языке Python. Данный алгоритм был адаптирован для сеточных данных в среде OpenGrADS. Изменение температуры частицы воздуха при влажноадиабатическом подъеме от уровня с давлением p до уровня с давлением p-dp,  $c\Pi a$  рассчитывается по формуле [28]

$$dT = T - 100 \, dp \frac{A}{1005 \cdot B \cdot C}$$

где

$$A = 1 + \frac{\left(\frac{622 e(2502.2 - 43089 T)}{p - 0.5 dp - 0.377 e}\right)}{287 (T + 273.15)},$$
  

$$B = 1 + \frac{622000 e(2502.2 - 43089T)^2}{288435 (p - 0.5 dp - 0.377 e) (T + 273.15)^2},$$
  

$$C = 100 \frac{p - 0.5 dp}{287 T \left(1 + \frac{0.3732 e}{p - 0.5 dp - 0.377 e}\right)},$$
  

$$e = 6.112 \exp\left\{\frac{17.67T}{T + 243.5}\right\},$$

где T – температура, °С.

Расчеты проводились с шагом по давлению 5 *гПа*. Для удобства восприятия алгоритм реализован в виде подпрограмм-функций.

# 2.4. Оценка качества прогноза опасных метеорологических явлений конвективного происхождения при помощи индексов неустойчивости по данным моделей GFS и GEM

Оценка проводилась для теплого периода 2015 года. Данные о конвективных ОЯ были взяты из описанной ранее базы данных опасных метеорологических явлений, произошедших на территории Пермского края [7].

Таблица 2.3

Дата	Место регистрации	Явление
1.06	Гидропост Усть-Пожва	Очень сильный дождь, 53 мм/12 ч
2.06	Гидропост Усьва	Очень сильный дождь, 92 мм/12 ч
16.06	Усольский район	Шквал, нет данных об интенсивности
20.06	Город Кунгур	Крупный град, до 3 см в диаметре
21.06	Метеостанция Кын	Очень сильный дождь, 45 мм/12 ч
22.06	Метеостанция Добрянка	Очень сильный дождь, 33 мм/12 ч
24.06	Город Пермь	Шквал, нет данных об интенсивности
25.06	Метеостанция Губаха	Очень сильный дождь, 117 мм/12 ч
25.06	Метеостанция Бисер	Метеостанция Бисер, 30 мм/12 ч
25.06	Гидропост Усьва	Очень сильный дождь, 53 мм/12 ч
25.06	Гидропост Верхне-Чусовские	Очень сильный дождь, 55 мм/12 ч
	городки	
29.06	Гидропост Кува	Очень сильный дождь, 53 мм/12 ч
29.06	Метеостанция Кудымкар	Очень сильный дождь, 40 мм/12 ч
12.07	Метеостанция Оханск	Очень сильный дождь, 44 мм/12 ч
12.07	Оханский район	Смерч, нет данных об интенсивности
12.07	Метеостанция Чернушка	Шквал, 28 м/с

### Конвективные ОЯ 2015 года

В табл. 2.3 приведены данные о 13 ОЯ, произошедших в теплый период 2015 года. Критерии ОЯ были взяты из наставления [42]. Стоит отметить, что для метеостанций и гидропостов, находящихся в горной части Пермского края (Кын, Бисер), критерием для ОЯ «очень сильный дождь» является 30 *мм*/12 *ч*.

Также в табл. 2.3 приведены сведения о 3 случаях выпадения сильных дождей, нанесших большой экономический ущерб и представляющих большой интерес для прогноза.

Таким образом, в 2015 году произошло 16 конвективных явлений, из которых 12 зарегистрировано по данным наблюдательной сети, 3 по свидетельствам очевидцев и 1 по данным космического мониторинга (табл. 2.3). Все конвективные явления отмечались при различных типах синоптических ситуаций. Во всех случаях ОЯ были сгенерированы мезомасштабными конвективными системами масштаба мезо-α и мезо-β [17, 28].

Для оценки выбраны 17 индексов неустойчивости, градации значений которых включают конвективные ОЯ, за исключением индекса VIMFC. Вначале для территории Пермского края выделялись зоны с благоприятными условиями для развития конвекции. Эти зоны находились при значениях VIMFC>0 и  $MULI_{PBL,0-180}>0$ . Индексы неустойчивости рассчитывались в точках с максимальными значениями VIMFC. Использовался модельный прогноз от 0 ч BCB. Расчет проводился с шагом по времени 3 ч и заблаговременностью до 27 ч. Прогноз опасного явления считался оправдавшимся, если оно зафиксировано на территории радиусом 50 *км* от точки прогноза и отклонением от прогноза по времени не более 3 ч. Для расчета были взяты модели NCEP-GFS и CMC-GEM, обладающие сходным пространственным разрешением выходных данных.

Всего летом 2015 года было зарегистрировано 16 конвективных ОЯ. По расчетам прогностических моделей благоприятные условия для развития глубокой конвекции были гораздо чаще: 106 случаев по данным модели GEM и 100 по данным модели GFS. Для каждого случая наличия благоприятных условий для конвекции были рассчитаны значения индексов неустойчивости.

Далее были рассчитаны несколько характеристик оправдываемости прогноза конвективных ОЯ [40], представленные в работе [22].

Общая оправдываемость ОЯ:

$$Ac_G = \frac{ts_{11} + ts_{22}}{ts_{00}} 100\% ,$$

где *ts*<sub>11</sub> — число оправдавшихся прогнозов ОЯ, *ts*<sub>22</sub> — число оправдавшихся прогнозов отсутствия ОЯ, *ts*<sub>00</sub> — общее число прогнозов наличия ОЯ.

Оправдываемость наличия ОЯ:

$$Ac = \frac{ts_{11}}{ts_{10}} 100\% ,$$

где *ts*<sub>11</sub> — число прогнозов наличия ОЯ.

Предупрежденность наличия ОЯ:

$$W = \frac{ts_{11}}{ts_{01}} 100\% ,$$

где *ts*<sub>01</sub> — число случаев ОЯ.

Оправдываемость отсутствия ОЯ:

$$Ac_{no} = \frac{ts_{22}}{ts_{20}} 100\%,$$

где *ts*<sub>20</sub> — число прогнозов отсутствия ОЯ.

Предупрежденность отсутствия ОЯ:

$$W_{no} = \frac{ts_{22}}{ts_{02}} 100\% ,$$

где *ts*<sub>02</sub> — число случаев отсутствия ОЯ.

Критерий Пирса-Обухова:

$$T = \frac{ts_{11}}{ts_{01}} - \frac{ts_{12}}{ts_{02}}$$

где *ts*<sub>12</sub> – число неоправдавшихся прогнозов наличия ОЯ.

По модели GEM (табл. 2.3) наилучшие значения критерия Пирса-Обухова отмечены у Thompson Index (0,27). Этот индекс показал 100% оправдываемости отсутствия и предупрежденности наличия ОЯ, так как не пропустил ни одного опасного явления, но при этом индекс имеет низкую общую оправдываемость (0,35). Более низкие значения критерия у ML LI (0,2), SRH (0,14), SB CAPE

(0,13) и MU CAPE (0,13); этим индексам характерны высокие значения общей оправдываемости и оправдываемости отсутствия ОЯ в сочетании с низкой оправдываемостью наличия. Высокие значения предупрежденности наличия ОЯ (0,92) отмечены у К Index и EPI при относительно низких значениях критерия Пирса-Обухова (0,07 и 0,01 соответственно).

Таблица 2.4

Индекс	$Ac_G$	Ac	W	Acno	W <sub>no</sub>	T
SB CAPE	0,75	0,17	0,33	0,9	0,8	0,13
ML CAPE	0,89	0	0	0,89	1	0
MU PBL CAPE	0,83	0,2	0,17	0,9	0,91	0,08
MU CAPE	0,75	0,17	0,33	0,9	0,8	0,13
LI	0,58	0,13	0,5	0,9	0,59	0,09
ML LI	0,87	0,38	0,25	0,91	0,95	0,2
MU PBL LI	0,67	0,1	0,25	0,88	0,72	-0,03
EPI	0,19	0,11	0,92	0,9	0,1	0,01
К	0,24	0,12	0,92	0,93	0,15	0,07
DCI	0,52	0,13	0,58	0,91	0,51	0,09
MCS	0,69	0,04	0,08	0,87	0,77	-0,15
DLS	0,82	0	0	0,88	0,93	-0,07
LLS	0,63	0,06	0,17	0,87	0,69	-0,14
SRH255	0,72	0,13	0,25	0,89	0,78	0,03
SCP	0,62	0,15	0,5	0,91	0,64	0,14
SWEAT	0,32	0,09	0,58	0,84	0,29	-0,13
TI	0.35	0.15	1	1	0,27	0,27

Значения параметров оправдываемости индексов неустойчивости

по данным модели GEM

По модели GFS (табл. 2.5) наилучшие значения критерия Пирса-Обухова отмечены у индексов SRH (0,31), MCS (0,24), MUCAPE (0,23), CAPE (0,23) при низких значениях оправдываемости наличия. 100% оправдываемости наличия ОЯ при относительно низких значениях критерия Пирса-Обухова имеют индексы EPI (0,06), K (0,06), TI (0,18). Также относительно высокие значения преду-прежденности наличия ОЯ имеет индекс SWEAT (0,92).

#### Значения параметров оправдываемости индексов неустойчивости

Индекс	Ac <sub>G</sub>	Ac	W	Acno	W <sub>no</sub>	Т
SB CAPE	0,83	0,31	0,33	0,91	0,9	0,23
ML CAPE	0,88	0	0	0,88	1	0
MU PBL CAPE	0,86	0	0	0,88	0,98	-0,02
MU CAPE	0,83	0,31	0,33	0,91	0,9	0,23
LI	0,53	0,13	0,5	0,89	0,53	0,03
ML LI	0,8	0,21	0,25	0,9	0,88	0,13
MU PBL LI	0,64	0,13	0,33	0,88	0,68	0,02
EPI	0,17	0,13	1	1	0,06	0,06
Κ	0,17	0,13	1	1	0,06	0,06
DCI	0,54	0,16	0,67	0,92	0,52	0,19
MCS	0,52	0,17	0,75	0,93	0,49	0,24
DLS	0,87	0,33	0,08	0,89	0,98	0,06
LLS	0,64	0,07	0,17	0,86	0,7	-0,13
SRH255	0,77	0,26	0,5	0,92	0,81	0,31
SCP	0,55	0,13	0,5	0,89	0,56	0,06
SWEAT	0,29	0,14	0,92	0,95	0,2	0,12
TI	0,28	0,14	1	1	0,18	0,18

по данным модели GFS

Таким образом, по результатам расчета индексов неустойчивости на данных прогностических моделей GEM и GFS можно сделать вывод о том, что наилучшими из них являются Индекс Томпсона, индекс Вайтинга и индекс потенциальной неустойчивости. При значениях этих индексов, не превышающих критические, развитие конвективных ОЯ маловероятно. Однако, эти индексы имеют высокий процент ложных тревог. Кроме того, модель GFS лучше подходит для прогноза конвективных ОЯ, чем GEM.

Также по результатам исследования можно заметить, что индекс MUCAPE в ситуациях со слабым динамическим фактором развития конвекции имеет хорошую предупрежденность развития ОЯ по обеим моделям. Однако, по данным модели GEM этим индексом следует пользоваться с осторожностью, так как завышенные значения приземной влажности, свойственные модели GEM, зачастую приводят к завышению значений этого параметра. Отчасти негативное влияние завышенной приземной влажности устраняется при помощи индексов ML CAPE и MU PBL MUCAPE, но эти индексы не подходят для прогнозирования конвективных ОЯ (возможно, пороговое значение для этих индексов завышено).

Также стоит отметить высокую предупрежденность ОЯ для индексов MCS, SRH и SWEAT для ситуаций со значительным динамическим фактором (по модели GFS). Этот факт также может указывать на то, что завихренность и сдвиги ветра значительно усиливают потенциал кучево-дождевого-облака (КДО), даже если оно в итоге не развивается по типу мезоциклона (суперячейки).

Не обнаружена связь ОЯ с индексами LI, ML LI, MU PBL LI, ML CAPE, MU PBL CAPE, LLS. Таким образом, данные индексы для прогноза конвективных ОЯ использовать нецелесообразно.

## 2.5. Создание индекса неустойчивости атмосферы, основанного на модификации метода частицы

Ежегодно в теплый период над территорией Пермского края фиксируются случаи опасных метеорологических явлений, связанных с развитием атмосферной конвекции. В подавляющем большинстве случаев эти ОЯ происходят под влиянием мезомасштабных конвективных систем (МКС) масштаба мезо-α и мезо-β [17, 28, 58]. Зачастую конвективные ОЯ не фиксируются наблюдательной сетью в связи с ее низкой плотностью. Таким образом, задачу прогноза конвективных ОЯ можно свести к прогнозу МКС.

Всего было рассмотрено 17 дней в июне—сентябре 2016 г. с условиями для развития глубокой конвекции. Из них в 14 случаях по данным Terra/Aqua MODIS были зафиксированы MKC, а в 9 случаях по данным сети метеостанций наблюдались ОЯ или комплекс неблагоприятных метеорологических явлений (КНЯ) конвективного характера. Таким образом, три раза MKC, вызвавшие ОЯ (КНЯ), не были зафиксированы по данным Terra/Aqua MODIS. Эти случаи

наблюдались 19.06.2016, 30.07.2016 и 28.08.2016 г., и были связаны с короткоживущими МКС масштаба мезо-β. В связи с отсутствием спутниковых данных, верификация прогноза этих случаев ОЯ (КНЯ) дана только по данным наблюдательной сети.

По выходным данным прогностических моделей производился расчет физико-статистических параметров (индексов) неустойчивости, по градациям значений которых оценивалась вероятность возникновения ОЯ конвективного характера. Рассчитывались значения следующих индексов неустойчивости: доступная потенциальная энергия неустойчивости (САРЕ), индекс плавучести (LI), энергия противодействия конвекции (СІN), индекс потенциальной неустойчивости (ЕРІ), индекс Вайтинга (К), индекс Томпсона (ТІ), индекс мезомасштабных конвективных систем (МСЅ), индекс опасной погоды (SWEAT), относительная завихренность (SRH) [12]. Для расчета были использованы выходные данные прогностических моделей GFS и ПЛАВ от 0 v BCB на срок 27 vс шагом по времени 3 v. Расчет проводился только для случаев, когда формировались условия, способствующие развитию глубокой конвекции. Расчет значений индексов СIN и SRH по данным модели ПЛАВ не производился.

Кроме того, для прогноза МКС в синоптических ситуациях со слабым динамическим фактором был разработан новый комплексный индекс неустойчивости, базирующийся на модификации индекса плавучести (LI). Под динамическим фактором понимается условие, способствующее развитию вынужденной конвекции (например, вынужденный подъем масс воздуха при прохождении быстродвижущегося холодного фронта). Индекс использует отклонение кривой стратификации от кривой состояния для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя до уровня изотерм 0, -20 и -40°C. Выбор этих изотерм обусловлен тем, что электризация в кучево-дождевом облаке происходит, если его верхняя граница превышает изотерму -22°C, а основание располагается ниже изотермы 0°C [41]. Если вершина кучево-дождевого облака превышает высоту изотермы -40°C, то это свидетельствует о возможном развитии

глубокой конвекции. Кроме того, в индекс вводится поправка на среднюю относительную влажность между изотермами 0 и –10°С. В итоге, индекс для прогноза конвективных ОЯ можно представить в следующем виде:

SEVERE \_ INDEX = 
$$RH_{0,-10} \frac{MULI_{0,-180,0} + MULI_{0,-180,-20} + MULI_{0,-180,-40}}{3}$$

где  $RH_{0,-10}$  — средняя относительная влажность в слое тропосферы между изотермами 0 и  $-10^{\circ}$ С;  $MULI_{0-180,0}$ ,  $MULI_{0-180,-20}$ ,  $MULI_{0-180,-40}$  — отклонение кривой стратификации от кривой состояния для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя до уровня изотерм 0, -20 и  $-40^{\circ}$ С соответственно.

Индекс обращается в ноль в том случае, если уровень конденсации располагается выше изотермы  $0^{\circ}$ С, либо если уровень конвекции располагается ниже изотермы  $-40^{\circ}$ С, что позволит уменьшить процент ложных тревог по сравнению с индексом плавучести (LI). Отрицательные значения индекса указывают на возможность развития МКС с опасными явлениями. Индекс для прогноза грозы без учета развития конвективных ОЯ выглядит следующим образом:

$$TS \_INDEX = RH_{0^{\circ}, -10^{\circ}} \frac{MULI_{0-180, 0^{\circ}} + MULI_{0-180, -20^{\circ}}}{2}$$

Отрицательные значения индекса указывают на возможность развития гроз.

Расчеты производились под управлением операционной системы Red Hat Enterprise Linux 6 на многопроцессорном вычислительном комплексе с гибридной архитектурой «ПГНИУ-Кеплер». Обработка результатов и оценка качества прогноза МКС проводились в программном пакете QGIS.

Для оценки качества прогноза была использована температура верхней границы облачности (ВГО), полученной со спутниковых снимков Terra и Aqua (прибор MODIS). Прогноз считался оправдавшимся, если МКС находилась на расстоянии не более 50 км от ближайшей точки со значением индекса, достигающим порогового уровня (при котором вероятно возникновение ОЯ конвективного характера). В связи с большим объемом данных, значения индексов

рассчитывались только в точках, где индекс Томпсона достигал порогового уровня. В случае, когда точка с максимальным значением индекса Томпсона лежит на расстоянии более 50 *км* от фактического положения МКС, то выбиралась еще одна точка с максимальным значением индексов в радиусе 50 *км* вокруг МКС. Обоснование выбора индекса Томпсона приведено ранее. Оценка качества прогнозов производилась по критерию Пирса-Обухова и связанным с ним характеристикам успешности прогноза.

На первом этапе расчетов использовались пороговые значения индексов, рекомендованные их разработчиками [12]. Эти значения были получены по результатам тестирования индексов на территории США и Западной Европы, и поэтому могут быть непригодны для прогноза на исследуемой территории. С учетом этого, для каждого индекса был произведен подбор оптимальных пороговых значений для территории Урала, при которых достигается наибольший процент оправдавшихся прогнозов. Исходные и оптимизированные пороговые значения индексов для моделей GFS и ПЛАВ приведены в табл. 2.6 и 2.7.

В целом качество прогноза МКС по модели GFS можно оценить как неудовлетворительное. Также стоит отметить, что в четырех случаях модель GFS неточно воспроизвела синоптическую ситуацию и положение зон активной конвекции, что отразилось на качестве прогноза МКС при помощи индексов неустойчивости. Наиболее подходящими для прогноза МКС по модели GFS оказались индексы CIN и SWEAT (табл. 2.6), так как они дают наибольший процент оправдавшихся прогнозов и обладают наибольшими значениями критерия Пирса-Обухова. Также сравнительно высоким процентом оправдавшихся прогнозов обладают индексы Томпсона и Вайтинга, но при этом они дают большой процент ложных тревог, что отражается в низких значениях критерия Пирса-Обухова. Разработанный индекс опасной погоды оказался неподходящим для прогноза МКС по данным модели GFS.

При использовании прогнозов модели ПЛАВ подбор оптимальных пороговых значений позволил существенно повысить значения критерия Пирса-

Обухова для ряда индексов (ML CAPE, MU PBL CAPE, MU CAPE, SB LI, ML LI). При этом количество оправдавшихся прогнозов возросло на 10—20%. При использовании прогнозов модели GFS, повысить успешность прогноза с помощью проведенной оптимизации удалось только для индекса SWEAT. Для остальных индексов существенно повысить качество прогноза не удалось процент оправдавшихся прогнозов увеличился на 10-20%, но значения критерия Пирса-Обухова остались неудовлетворительными.

Оптимизированные пороговые значения большинства индексов оказались по модулю существенно ниже, чем рекомендованные разработчиками. Это позволило многократно сократить количество пропусков явлений (в ряде случаев — в 10 раз и более). При этом значительно возросло также число ложных тревог, но рост процента ложных тревог оказался меньше, чем сокращение процента пропусков явлений.

Таблица 2.6

до и после подбора пороговых значений:						
В	числителе – зн	ачение до подб	ора, в знамен	ателе – после	подбора	
	Параметр					
Индекс	Пороговое значение	Критерий Пирса- Обухова	Ложные тревоги, %	Пропуски, %	Оправдавшиеся прогнозы, %	
SB CAPE	2500/1400	-0,04/-0,05	2,7/10,8	64,9/48,6	32,4/40,5	
ML CAPE	2500/800	0/0,22	0/16,2	67,6/48,6	32,4/35,1	
MU PBL CAPE	2500/1200	0/-0,01	0/10,8	67,6/48,6	32,4/40,5	
MU CAPE	2500/1400	-0,04/-0,01	2,7/13,5	64,9/46	32,4/40,5	
SB CIN	-200/-200	0,12/0,12	27/27	2,7/2,7	70,3/70,3	
SB LI	-6/-1	-0,01/-0,08	5,4/32,4	56,8/5,4	37,9/62,2	
ML LI	-6/-0,5	-0,08/-0,08	2,7/32,4	67,6/5,4	29,7/62,2	
MU PBL LI	-6/-1,5	-0,12/-0,04	5,4/29,7	64,9/8,1	29,7/62,2	
EPI	0/0	0,06/0,06	18,9/18,9	43,2/43,2	37,8/37,8	
K	35/30	-0,22/-0,04	16,2/32,4	29,7/2,7	54,1/64,9	
MCS	0/0	-0,04/-0,04	5,4/5,4	59,5/59,5	35,1/35,1	
SRH	150/150	0,11/0,11	5,4/5,4	48,6/48,6	45,9/45,9	
SWEAT	250/190	0,06/0,22	16,2/16,2	29,7/18,9	54,1/64,9	
TI	40/32	0,03/-0,04	8,1/32,4	48,6/2,7	43,2/64,9	
SEVERE	0/0	-0,15/-0,15	29,7/29,7	16,2/16,2	54,1/54,1	

# Оценка успешности прогноза МКС по модели GFS

#### Таблица 2.7

	Параметр				
Инново	Пороговое	Критерий	Ложные	Пропуски,	Оправдавшиеся
индекс	значение	Пирса-	тревоги,	%	прогнозы, %
		Обухова	%		
SB CAPE	2500/500	0,11/0,15	0/28,6	51/10,2	49/61,2
ML CAPE	2500/300	0/0,29	0/24,5	57,1/8,2	42,9/67,3
MU PBL	2500/700	0/0,17	0/18,4	57,1/22,4	42,9/59,2
CAPE					
MU CAPE	2500/500	0,11/0,31	0/26,5	51/4,1	49/69,4
SB LI	-6/-2	0,06/0,18	2/24,5	51/14,3	50/61,2
ML LI	-6/-1	0,04/0,27	0/26,7	55,1/6,1	44,9/67,3
MU PBL LI	-6/-2,5	0,1/0,18	0/16,3	51/24,5	49/59,2
EPI	0/0	0,18/0,18	12,2/12,2	30,6/30,6	57,1/57,1
K	35/34	-0,15/-0,15	14,3/14,3	46,9/47	38,8/38,8
MCS	0/0	0,07/0,07	0/0	53,1/46,9	46,9/46,9
SWEAT	250/210	0,04/0,07	12,2/12,2	38,8/36,7	49/51
TI	40/33	-0,04/0,14	6,1/30,6	51/8,2	42,9/61,2
SEVERE	0/0	0,18/0,18	30,6/30,6	6,1/6,1	63,3/63,3

Оценка успешности прогноза МКС по модели ПЛАВ до и после подбора пороговых значений: в числителе – значение до подбора, в знаменателе – после подбора

По модели ПЛАВ качество прогноза МКС оказалось лучше, чем по GFS, так как модель ПЛАВ только в одном случае (31.07.2016) не воспроизвела текущую синоптическую ситуацию. По модели ПЛАВ наилучшие значения критерия Пирса-Обухова отмечены у различных разновидностей индексов САРЕ и LI (табл. 2.7), но полученные пороговые значения оказались довольно низкими. Высокие значения критерия Пирса-Обухова отмечены также у индекса EPI, но он дает значительный процент пропусков МКС. Кроме того, высокими значениями критерия Пирса-Обухова обладают индекс Томпсона и разработанный индекс опасной погоды. Наиболее мощные МКС развивались при значениях разработанного индекса опасной погоды –3 и ниже. Для разработанного индекса характерен низкий процент неоправдавшихся прогнозов и относительно высокий процент ложных тревог. Пример применения разработанного индекса представлен на рис. 2.3 и 2.4. Заметно, что поле его отрицательных значений занимает меньшую площадь, чем у Lifted Index, что указывает на снижение числа ложных тревог. В последующих исследованиях предполагается улучшить разработанный индекс заменой наиболее неустойчивого слоя на перемешанный слой, а также учесть в индексе динамический фактор.



Рис. 2.3. Прогноз МКС 7.06.2016 (модель ПЛАВ): *a)* температура ВГО, снимок AQUA в 8 *ч* 50 *мин* ВСВ, *б)* прогностическое поле индекса опасных явлений, в 9 *ч* ВСВ; *в)* прогностические поля индексов Томпсона и плавучести в 9 *ч* ВСВ.



Рис. 2.4. Прогноз МКС 12.07.2018 (модель ПЛАВ): *а)* температура ВГО, снимок AQUA в 9 *ч* 20 *мин* ВСВ, *б)* прогностическое поле индекса опасных явлений в 9 *ч* ВСВ; *в)* прогностическое поле индекса плавучести в 9 *ч* ВСВ.

Таким образом, у отечественной модели ПЛАВ отмечено более высокое качество прогноза, чем у GFS. На основе данных модели ПЛАВ наилучшее качество прогноза МКС в ситуациях без значительного динамического фактора развития конвекции отмечено с применением индексов Томпсона, MU CAPE и разработанного индекса опасной погоды, в то время как для модели GFS наилучшее качество прогноза достигается применением индексов Томпсона, Вайтинга и CIN. Для прогноза МКС по обеим моделям в ситуациях со значительным динамическим фактором рекомендуется использовать индекс SWEAT.

Фундаментальной причиной, объясняющей более высокое качество прогноза МКС по модели ПЛАВ, является то, что данная модель адаптирована для территории России, а GFS — для территории США. В связи с этим, можно предположить, что отечественная модель также более успешно воспроизводит синоптическое положение и метеорологические явления в другие сезоны года.

### 2.6. Выводы по главе 2

1. По результатам расчета индексов неустойчивости с использованием данных моделей GEM и GFS можно сделать вывод о том, что наилучшими из них являются индексы Томпсона и Вайтинга и индекс потенциальной неустойчивости. При значениях этих индексов, не превышающих критические, развитие конвективных ОЯ маловероятно. Однако, эти индексы имеют высокий процент ложных тревог. Кроме того, модель GFS лучше подходит для прогноза конвективных ОЯ, чем GEM.

2. Индекс MU CAPE в ситуациях со слабым динамическим фактором развития конвекции имеет хорошую предупрежденность развития ОЯ по обеим моделям. Однако, по данным модели GEM этим индексом следует пользоваться с осторожностью, так как завышенные значения приземной влажности, свойственные данной модели, зачастую приводят к завышению значений данного

параметра. Отчасти негативное влияние завышенной приземной влажности устраняется при помощи индексов ML CAPE и MU PBL CAPE, но эти индексы не подходят для прогнозирования ОЯ в ситуациях со значительным динамическим фактором (возможно также, что пороговое значение для этих индексов завышено).

3. Стоит отметить высокую предупрежденность ОЯ для индексов MCS, SRH и SWEAT для ситуаций со значительным динамическим фактором по модели GFS.

4. Среди рассмотренных глобальных моделей наилучшим качеством прогноза МКС в теплый период года обладает отечественная модель ПЛАВ, так как ошибки воспроизведения синоптической ситуации данной моделью встречаются реже, чем у GFS. Совместно с этой моделью для синоптических ситуаций с незначительным динамическим фактором следует применять различные виды индекса плавучести LI (в особенности ML LI), энергии неустойчивости САРЕ, индекс Томпсона, а также разработанный автором индекс опасной погоды.

5. Автором разработана модификация индекса плавучести для наиболее неустойчивого перемешанного слоя MU PBL LI. С помощью данного индекса увеличилось количество оправдавшихся прогнозов по сравнению с индексом плавучести за счет замены разности температуры частицы и окружающего частицу воздуха на изобарической поверхности 500 *гПа* средним значением, рассчитанным для этой же разности на высотах изотерм 0, –20 и –40°С.

### 3. ПРОГНОЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕЗОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ

### 3.1. Исходные данные и методика исследования

Анализ случаев конвективных ОЯ, занесенных в базу данных опасных явлений Пермского края, показал, что почти все они связаны с мезомасштабными конвективными системами масштаба мезо-α и мезо-β [56]. Исходя из этого, целесообразно проводить непосредственное моделирование МКС, как источника конвективных ОЯ, без использования физико-статистических параметров неустойчивости с применением мезомасштабных прогностических моделей. Для решения этой задачи применяются два подхода: моделирование конвекции при помощи параметризаций конвективных процессов подсеточного масштаба и непосредственное моделирование глубокой конвекции.

В качестве мезомасштабной прогностической модели была выбрана мезомасштабная негидростатическая модель WRF с динамическими ядрами ARW и NMM.

Таблица 3.1

используемых для настроики модели wkf						
Характеристика	Узел №1 (с 2014 г.)	Узел №2 (с 2018 г.)				
Процессор	Intel Core-i5 3570K	Intel Core-i7 8700K				
	(3.4—3.8 <i>ΓΓų</i> )	(3.7—4.7 <i>ΓΓų</i> )				
Объем оперативной	24	16				
памяти, ГБ						
WRF, версия	361 381 3911	3.9.1.1				

### Характеристики вычислительных узлов, используемых для настройки модели WRF

Для настройки, обкатки технологии прогноза и тестирования модели WRF использовались вычислительные узлы на базе персональных компьютеров. Ха-

рактеристики этих вычислительных узлов, а также установленного на них программного обеспечения приведены в табл. 3.1.

Программные комплексы моделей WRF-ARW и WRF-NMM установлены на многопроцессорном вычислительном комплексе с гибридной архитектурой «ПГНИУ-Кеплер», состоящем из 8 вычислительных узлов iDataPlex DX360 M4 на базе процессоров Intel Xeon E5-2680 и видеокарт NVidia Tesla K20 [38].

Динамические ядра ARW и NMM использовали набор параметризаций подсеточных процессов (за исключением глубокой конвекции), рекомендованный руководством по экспликации модели для использования в средних широтах (табл. 3.2) [106]. Набор параметризаций для динамических ядер NMM и ARW различный, так как динамическое ядро NMM протестировано с ограниченным их набором.

Таблица 3.2

Характеристика модели	Принятая настройка		
Размерность домена и шаг сетки	800х800 (2 км)		
	600х600/380х750 (3 км)		
	500х500 (4 км)		
	400х400 (5 км)		
	334х334 (6 км)		
	278х278/200х380 (7.2 км)		
	224х224 (9 км)		
	200х200 (10 км)		
	180х180 (12 км)		
Число вертикальных уровней	42		
Временной шаг вывода данных	1 <i>u</i>		
Динамическое ядро	ARW/NMM		
Начальные условия	Прогноз и реанализ моделей NCEP-GFS и		
	NCEP-CFS		
Микрофизика облачности	Схема Томпсона		
Планетарный пограничный слой	Схема университета Yonsei/Схема Меллора-		
	Ямады-Янича (Eta)		
Подстилающая поверхность	Модель Noah		
Коротковолновая и длинноволновая	Rapid Radiative Transfer Model		
радиация	(RRTM)/Схема GFDL (Eta)		
Приземный слой	Схема Монина-Обухова с вязким подслоем		
	Карлсона-Боланда и стандартными функци-		
	ями подобия		

Набор используемых параметризаций подсеточных процессов

для динамических яд	ер NMM и ARW
---------------------	--------------

Расчет проводился на сетках с различным пространственным разрешением (от 2 до 12 *км*). Уменьшение шага сетки приводит не только к увеличению числа точек расчетной области, но и к уменьшению шага модели по времени. Характеристики используемых расчетных сеток приведены в табл. 3.2. В качестве центра расчетной области была выбрана точка 58° с.ш. и 56° в.д. (г. Пермь).

Для перевода данных счета модели из формата NetCDF в код GRIB-1 использовался программный комплекс UPP 2.2. Кроме интерполяции данных счета модели на изобарические поверхности этот программный комплекс также позволяет вычислять дополнительные характеристики атмосферы (например, радиолокационную отражаемость, различные разновидности LI и CAPE, высоту и температуру верхней границы облачности и др.).

Визуализация выходных данных выполнялась в программных пакетах OpenGrADS 2.0.2 и ArcGIS 10.1. Вывод в программном комплексе OpenGrADS осуществлялся в графический формат PNG, растровый формат GeoTIFF и векторный формат SHP. Данные в растровом и векторном форматах использовались для сопоставления с данными дистанционного зондирования в ArcGIS. Использовались следующие выходные данные модели: интенсивность осадков в виде дождя и града (крупы), MM/4; расчетное максимальное значение радиоэха конвективных облаков, DBz; средняя скорость ветра и скорость ветра в порывах (с учетом вертикальной составляющей) на высоте 10 M, M/c; высота верхней границы облаков (ВГО) (Нвго,  $\kappa M$ ) и температура на данном уровне (температура ВГО, °С).

Оценка качества результатов моделирования производилась путем их сопоставления со спутниковыми данными Terra/Aqua MODIS, полученными из архивов NASA (Goddard Space Flight Center). Использовались измерения радиояркостной температуры верхней границы облаков в 31 канале прибора MODIS (с пространственным разрешением 1000 *м*). Дополнительно выполнялось сопоставление выходных данных модели с данными метеорологического радиолокатора МРЛ-5, установленного в аэропорту Большое Савино (Пермь). Про-

странственное совмещение данных спутниковых и радиолокационных наблюдений с результатами моделирования выполнялось средствами программного пакета ArcGIS.

Для валидации результатов моделирования применялась модификация объектно-ориентированного метода оценки качества прогнозов [14]. Объектноориентированный метод предполагает сопоставление фактического (определяемого по данным спутниковых наблюдений и МРЛ) и прогностического положения МКС и зон опасных явлений погоды. Критериями оценивания являются расстояния между центрами тяжести объектов по фактическим данным и по результатам моделирования, а также максимальные значения оцениваемых переменных (высота и температура ВГО, интенсивность осадков, скорость шквала). В отличие от точечного оценивания по данным метеостанций, данный метод позволяет разделить ошибку прогноза на две составляющие: ошибку в амплитуде (интенсивности) и в положении объекта. Последняя обусловлена, главным образом, начальными условиями, поэтому ее устранение вызывает большие сложности.

### 3.2. Подбор параметризации глубокой конвекции

Для моделирования конвекции в программном комплексе модели WRF предлагается несколько процедур параметризации. Они используются, если шага сетки по горизонтали недостаточно для прямого моделирования конвекции. При запуске модели на высокодетальных сетках (с горизонтальным шагом 4 *км* и менее) возможно прямое моделирование конвективных течений [63], без использования процедур параметризации. Для оценки преимуществ или недостатков прямого моделирования конвекции над исследуемой территорией в сравнении с применением ее параметризаций, было проанализировано 6 случа-

ев развития МКС с сильными ливнями, шквалами и градом (наблюдавшихся в 2002—2010 гг.) [58].



Рис. 3.1. Оценка прогноза конвективных осадков (по максимальному значению радиоэха) на 13 ч ВСВ 20.07.2004 г: *а*) прямое моделирование конвекции на сетке 4 *км*, *б*) параметризация Каина-Фритша; *в*) параметризация Грелла-Девени, *г*) параметризация Беттса-Миллера-Янича, *д*) параметризация Беттса-Миллера-Янича, *е*) фактические данные (метеоявления по данным МРЛ Большое Савино, в 13 *ч* 14 *мин* ВСВ).



Рис. 3.2. Оценка прогноза радиоэха зон осадков в 15 ч ВСВ 17.05.2007: *а*) прямое моделирование конвекции на сетке 4 км, б) прямое моделирование конвекции на сетке 10 км, в) параметризация Каина-Фритша, *г*) параметризация Грелла-Девени, *д*) параметризация Беттса-Миллера-Янича, *е*) фактические данные (метеоявления по данным МРЛ Большое Савино, в 14 ч 16 мин ВСВ).

Запуск модели производился с использованием трех различных схем параметризации конвекции при шаге сетки 10 км, а также с отключенной парамет-
ризацией, т.е. в режиме прямого воспроизведения конвективных течений (при шаге сетки 4 и 10 км). Проверочным материалом для оценки качества моделирования послужили данные МРЛ и спутниковые снимки Terra/Aqua MODIS. По ним оценивались фактическое положение и интенсивность МКС в сопоставлении с их прогностическим положением. Совмещение фактических и модельных данных выполнялось средствами ПО ArcGIS. По данной выборке случаев был получен вывод о том, что в условиях изучаемой территории прямое моделирование конвекции на сетке 4 км (без использования параметризаций) обеспечивает получение более достоверного прогноза положения и интенсивности МКС, чем любая из предложенных в модели схем параметризации. Данный вывод проиллюстрирован на примере случая прохождения неорганизованного МКК с сильными грозами и шквалами до 27 м/с над территорией Пермского края 20.07.2004 г (рис. 3.1) и на примере прохождения линии шквалов 17 мая 2007 г. (рис. 3.2), из которых следует, что прямое моделирование конвекции предпочтительнее использования параметризаций даже при грубом шаге сетки (10 км). Однако, шага сетки 10 км недостаточно для воспроизведения ячейковой структуры МКС, поэтому дальнейшие расчеты целесообразно проводить на высокодетальных сетках с шагом по горизонтали 4 км и менее.

# 3.3. Оценка применимости прямого моделирования конвекции для прогнозирования мезомасштабных конвективных систем

Для данного эксперимента расчеты проводились по 22 случаям возникновения МКС на территории Пермского края [91]. Запуск модели проводился на сетке с горизонтальным разрешением 4 *км*. Общая оценка успешности прогнозов производилась по трем градациям. В ряде случаев объект (МКС) вообще не воспроизводился моделью, или же местоположение его центра тяжести отличалось от фактического (определенного по спутниковым данным) более чем на

150 км. Такие прогнозы оценивались как не оправдавшиеся (оценка «0»). Если МКС воспроизводилась моделью, но ее характеристики (высота ВГО, площадь, пространственное положение) существенно отличались от фактических (определенных по данным дистанционного зондирования), то прогноз считался частично оправдавшимся (оценка «0,5»). Прогноз оценивался как оправдавшийся (оценка «1») в случае, если модель воспроизводила МКС с незначительными ошибками по ее положению в пространстве и параметрам интенсивности. Полученные оценки прогнозов приведены в табл. 3.3.

Как видно из табл. 3.3, в половине рассмотренных случаев прогнозы модели WRF оцениваются как не оправдавшиеся. Из них в четырех случаях модель не воспроизводит появление МКС над изучаемой территорией, а в шести случаях имеет место значительное смещение МКС относительно фактического положения в пространстве. Ошибки в прогнозе положения МКС, как правило, связаны с влиянием начальных условий (например, со смещением фронтальной зоны относительно ее положения по данным глобальной модели). Случаи же, когда модель WRF вообще не воспроизводит глубокую конвекцию, наблюдаются при определенном типе синоптических процессов. Модель не прогнозирует возникновение МКС во внутримассовых ситуациях, когда отсутствует выраженная зона сходимости воздушных течений (из рассмотренных случаев — 24 июня 2013 г. и 20 июня 2015 г.). Заметно повышается успешность прогноза в случаях с хорошо выраженными фронтальными зонами. В свою очередь, такие параметры, как температура и высота верхней границы облаков, средняя скорость ветра и скорость порывов ветра при шквалах, а также мгновенная интенсивность осадков (определяемая по значениям радиоэха) воспроизводятся моделью достаточно адекватно.

Оценка успешности прогноза мезомасштабных конвективных систем по модели WRF

Дата	Тип	Максимальная	Температура ВГО,	Наблюдавшиеся опасные явления	Оценка
	МКС	Нвго, км	°C		качества
		(данные МРЛ/	(данные MODIS/		прогноза
		модель)	модель)		_
20.07.2004	МКК	13/14	<60/<60	Шквал 27 <i>м/с</i> , град	1
20.08.2008	МКК	15/-	<-60/-	Крупный град 20–70 мм	0
06.06.2009	МКК	13/12	<60/<60	Крупный град 33 мм	1
19.06.2009	ЛШ	13/13	<-60/<-60	Шквал 24–28 м/с, град	0,5
03.08.2010	МКК	13/13	-60/-60	Шквал 18-21 м/с, град	0,5
05.06.2011	ЛШ	12/12	-55/-55	Ливневые дожди, шквал до 17 м/с, град	1
06.07.2011	МКК	-/11	<-60/-55	Сильный ливень (до 39 мм/12 ч)	0,5
04.06.2012	МКК	-/-	<-60/-	Сильный ливень (39—42 мм/12 ч)	0
09.06.2012	МКК	13/13	<60/<60	Крупный град 30 мм, шквал до 22 м/с, сильный ливень (до	0
				49 мм)	
21.06.2012	МКК	13/-	<-60/-	Сильный ливень (23—34 мм/12 ч)	0,5
22.06.2012	МКК	12/12	-60/-55	Сильный ливень (58 мм/12 ч)	1
04.07.2012	МКК	13/12	-60/-55	Сильный ливень (40—55 мм/12ч)	0,5
18.07.2012	МКК	13/13	<-60/-60	Шквал 20—28 м/с, сильный ливень (до 36 мм), град (до 22	0,5
				мм)	
18.07.2012	ЛШ	13/-	-55/	Шквал 20—28 м/с	0
09.08.2012	МКК	-/13	/60	Сильные ливни (до 63 мм/12 ч)	1
24.06.2013	МКК	-/-	<-60/-	Крупный град 18—30 мм	0
11.07.2013	МКК	-/-	-55/-	Сильные ливни (30—35 мм/12 ч)	0
06.07.2014	МКК	13/12	-55/-55	Сильные ливни (26—44 мм/12ч)	0,5
29.08.2014	МКК	14/-	<-60/-	Смерч, град до 50 мм, шквал 22 м/с, сильный дождь (до 30	0
				мм)	
20.06.2015	МКК	-/-	<-60/-	Сильные ливни (22—45 мм/12 ч)	0
24.06.2015	МКК	14/13	<-60/-60	Сильные ливни (до 117 мм/12 ч), шквал, град	1
29.06.2015	ЛШ	14/-	<-60/-	Шквал до 29 м/с, сильные ливни (до 40 /12 и)	0

Существенное влияние на успешность прогноза пространственного положения и интенсивности МКС может оказывать выбор шага модельной сетки по горизонтали. Для оценки степени влияния этого параметра был проведен численный эксперимент по подбору шага сетки для нескольких случаев возникновения МКС (07 июня 2009 г., 21 июня 2012 г., 18 июля 2012 г., 24 июня 2013 г.). Расчеты производились с шагом сетки 2, 3, 4, 9, 12 *км*, при этом начальные и граничные условия и наборы используемых параметризаций подсеточных процессов не варьировались.

По результатам этих численных экспериментов было установлено, что результаты моделирования с разным (даже близким, например 3 и 4 км) шагом сетки могут принципиально различаться. Лишь в одном из рассмотренных случаев (24 июня 2013 г.) модель WRF не воспроизвела конвекцию при проведении расчета с любым пространственным разрешением. В других случаях удалось подобрать оптимальный шаг сетки (2 или 3 км), при котором пространственное положение МКС воспроизводится с наибольшей достоверностью. Кроме этого, увеличение пространственного разрешения позволяет получить более адекватную оценку максимальной скорости ветра при шквале. Пример влияния шага сетки на прогноз пространственного положения МКК приведен на рис. 3.3. В данном случае, при выполнении расчета с шагом сетки 9 км модель воспроизводит формирование МКС существенно южнее ее фактического положения. При шаге сетки 3 км пространственное положение МКС воспроизводится точнее, однако результаты счета модели свидетельствуют о том, что конвективная система уже находится в стадии диссипации, в то время как по фактическим данным она была на максимальной стадии развития. Кроме того, по данным метеорологического локатора МРЛ-5 в г.Пермь, в составе данного МКК на стадии максимального развития прослеживался мезоциклонический вихрь диаметром более 100 км с крючкообразной структурой радиоэха (рис. 1.2).



Рис. 3.3. Температура верхней границы облаков, 21.06.2012 г. в 18 ч ВСВ: *а*) по спутниковым данным MODIS, *б*) по модели WRF, расчет с шагом сетки 9 км, *в*) по модели WRF, расчет с шагом сетки 3 км.

# 3.4. Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением модели WRF с динамическими ядрами ARW и NMM

Расчеты выполнены с использованием модели WRF версии 3.8.1 с динамическими ядрами ARW (Advanced Research WRF) и NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). Одной из целей проведенного исследования было сравнение воспроизводимости процессов формирования и эволюции МКС с помощью этих моделей. Воспроизведение глубокой конвекции производилось в режиме прямого моделирования без использования процедур параметризации на сетке с воским горизонтальным разрешением (3 км). Принятые настройки модели описаны в табл. 3.4. В качестве начальных и граничных условий были использованы прогностические данные модели NCEP-GFS с пространственным разрешением  $0.5^{\circ}$ , а также данные реанализа этой модели за предыдущие 12 ч. Необходимость предварительного усвоения данных реанализа обусловлена тем, в начале счета прогностических моделей неизбежно возникают ошибки, которые приводят к ухудшению качества воспроизведения метеорологических величин в течение нескольких часов от начала прогноза [97].

В качестве проверочного материала для оценки прогнозов МКС по мезомасштабным моделям обычно используются данные доплеровских радиолокаторов (ДМРЛ), а сама оценка выполняется с применением объектноориентированного подхода [14, 15, 72].

Таблица 3.4

#### Набор используемых параметризаций подсеточных процессов

Характеристика модели	Принятая настройка			
Шаг сетки	3 км/0.0191×0.0189°			
Число узлов	600×600/380×750			
Число вертикальных уровней	42/42			
Модель рельефа	U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)			
Срок прогноза	27 ч, от 00 ВСВ, с предварительным усвоением данных ре-			
	анализа за 12 ч			
Временной шаг вывода данных	1 4			
Динамическое ядро	ARW/NMM			
Шаг интегрирования по време-	18 c/6 c			
ни				
Начальные и граничные усло-	Прогноз GFS с шагом сетки 0,5°			
вия				
Микрофизика облачности	Схема Томпсона			
Планетарный пограничный	Схема университета Yonsei/Схема Меллора-Ямады-Янича			
слой	(Eta)			
Подстилающая поверхность	Модель Noah			
Коротковолновая и длинновол-	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)/Схема GFDL (Eta)			
новая радиация				
Приземный слой	Схема Монина-Обухова с вязким подслоем Карлсона-			
	Боланда и стандартными функциями подобия			
Конвекция	Прямое моделирование (без параметризации)			

#### для динамических ядер NMM и ARW

Процедура верификации на основе упрощенного объектноориентированного подхода в основных чертах описана в работах [58, 91]. В качестве критериев оценки учитывалось расстояние между фактическим и мо-

дельным положением МКС в момент получения спутникового снимка (ошибка по положению), а также значение температуры ВГО по данным MODIS и по модели (табл. 3.4). Критерии для определения качества прогноза представлены в п. 3.3.

В целом из табл. 3.5 следует, что успешность прогноза МКС по моделям WRF/ARW и WRF/NMM различается незначительно. Обе модели не воспроизводят развитие глубокой конвекции во внутримассовых ситуациях, когда отсутствует выраженная сходимость воздушных течений. Аналогичные результаты были получены и в работе [91]. Более надежные прогнозы получены в случаях, когда МКС формировались на хорошо выраженных атмосферных фронтах и на фоне высокого общего влагосодержания атмосферы (например, 20.06.2016, 12.08.2016 г.). Также обе модели существенно завышают площадь облачности верхнего яруса, образующейся при развитии МКС. В большей степени этот недостаток характерен для модели NMM (рис. 3.5—3.7).

Относительно оценки прогноза самих ОЯ (табл. 3.5—3.6) стоит отметить существенное различие между динамическими ядрами ARW и NMM по характеру ошибок (пропусков и ложных тревог). Так, для модели WRF с динамическим ядром ARW более характерны ошибки пропуска явления (пять из девяти рассмотренных случаев). Модель NMM дает меньшее число пропусков, но значительно завышает количество ливневых осадков и дает большое число ложных тревог по сильным ливням, что соответствует оценкам, приведенным в работах [14, 15]. Осредненное по территории количество конвективных осадков по модели WRF с динамическим ядром NMM во всех рассматриваемых случаях было в 1,5—2,2 раза больше, чем по модели ARW. Что касается прогноза шквалов, то для оценки его надежности имеющейся выборки было недостаточно.

Оценка успешности прогноза МКС по модели WRF

Дата	Время	Минимальная тем-	Мини-	Максимальная	Расстояние между фак-	Общая оценка успешно-
		пература ВГО, °С	мальная	отражаемость, DBz	тическим и модельным	сти прогноза
		(WRF-ARW / WRF-	темпера-	(WRF-ARW/WRF-	положением МКС	
		NMM)	тура ВГО,	NMM)	(WRF-ARW /	
			°C		WRF-NMM)	
			(MODIS)			
07.06.2016	08.50	-60/-60	-61	54/56	100/90	0,5/0,5
07.06.2016	16.35	-58/-59	-59	46/46	-/115	0/0,5
07.06.2016	18.15	-58/-58	-56	41/46	-/125	0/0,5
20.06.2016	08.05	-68/-64	-63	65/60	15/40	1/0,5
20.06.2016	09.55	-64/-63	-65	57/57	0/60	1/0,5
23.06.2016	08.50	-52/-54	-55	51/55	45/20	0,5/1
11.07.2016	08.35	–56/Нет данных	-57	54/Нет данных	125/Нет данных	0,5/Нет данных
12.07.2016	07.30	-58/-56	-59	56/52	60/100	0,5/0,5
12.07.2016	09.20	-58/-54	-58	55	70/40	0,5/0
13.07.2016	10.00	-56/-52	-53	53/54	65/70	0,5/0,5
17.07.2016	17.25	-47/-51	-52	49/57	-/70	0/0,5
01.08.2016	08.55	-62/-63	-65	57/68	100/40	0,5/0,5
01.08.2016	16.45	-63/-62	-66	57/57	70/-	0,5/0
04.08.2016	09.25	_/_49	-63	-/48	—/10	0/0
11.08.2016	09.30	-54/-57	-61	25/57	10/70	0/0,5
12.08.2016	18.00	-61/-57	-61	60/58	100/50	0,5/1
14.08.2016	21.50	_/_	-64	_/_	_/_	0/0
24.08.2016	22.30	-59/-	-58	53/46	110/-	0,5/0
04.09.2016	18.05	-48/-52	-57	47/50	35/100	0,5/0,5

\* – прочерк означает отсутствие явления по модели

Таблица 3.6

## Оценка успешности прогноза ОЯ по модели WRF

Дата, время	Характеристика ОЯ или КНЯ	Максимальное количество осадков по модели в радиусе 100 км (ARW/NMM), <i>мм</i>	Максимальная скорость шквала по модели в радиусе 100 <i>км</i> (ARW/NMM)	Ошибка по по- ложению места возникновения ОЯ, км	Ошибка по времени возникновения ОЯ, ч	Общая оценка успешности прогноза
20.06.2016,	МС Верещагино: очень	12/55	_/_	-/30	/3	0/0,5
18—21 <i>ч</i> ВСВ	сильный дождь 61 <i>мм</i> , шквал 20 <i>м/с</i>					
12.07.2016,	МС Чернушка: шквал 24	47/30	15/15	40/70	1/2	0,5/0,5
12 <i>ч</i> ВСВ	<i>м/с</i> . ливень 29 <i>мм</i> / 1 <i>ч</i> , град 10 <i>мм</i>					
17.07.2016,	МС Кунгур: очень сильный	20/68	_/_	-/30	-/3	0/0,5
15—21 ч ВСВ	дождь 51 <i>мм</i> /6 ч					
31.07.2016,	МС Кочево: сильный ли-	99/70	13/13	20/67	0/1	1/0,5
12 ч ВСВ	вень (46 мм/52 мин)					
01.08.2016,	МС Кочево: шквал 22 м/с,	28/86	—/17	40/70	3/0	0/1
09—15 ч ВСВ	ливень 27 мм					
04.08.2016,	МС Чермоз: шквал 25 м/с,	_/_	_/_	_/_	_/_	0/0
10 ч ВСВ	ливень 23 мм					
11.08.2016,	МС Оханск: сильный ли-	27/117	18/14	85/5	3/0	0/1
12 ч ВСВ	вень (45 мм/ 1 ч)					
12.08.2016,	МС Чердынь: сильный ли-	52/70	18/16	30/40	0/0	1/0,5
15—18 <i>ч</i> ВСВ	вень (32 мм/ 1 ч)					
28.08.2016,	Град диаметром 14 мм, ли-	10/25	15/19	-/50	1/1	0/0,5
МС Пермь	вень 19 мм, шквал (около					
	20 м/с по косвенным при-					
	знакам)					



Рис. 3.5. Прогноз МКС 12.08.2016 г. в 18 u ВСВ: a) прогностическое поле значений индекса опасной погоды по модели ПЛАВ;  $\delta$ ) температура ВГО по данным спутника Aqua (прибор MODIS) в 18 u ВСВ; прогностическое поле температуры ВГО по моделям WRF-NMM (b) и WRF-ARW (z); прогностическое поле радиолокационной отражаемости по моделям WRF-NMM (d) и WRF-ARW (e).



Рис. 3.6. Прогноз МКС 20.06.2016 г. моделью WRF-ARW: *a*) температура ВГО, снимок AQUA, 8 *ч* 20 *мин* ВСВ, *б*) прогностическое поле температуры ВГО в 9 *ч* ВСВ; *в*) прогностическое поле радиолокационной отражаемости, 9 *ч* ВСВ



Рис. 3.7. Прогноз МКС 20.06.2016 г. моделью WRF-NMM: *a)* температура ВГО, снимок AQUA, 8 ч 20 мин ВСВ, *б)* прогностическое поле температуры ВГО в 9 ч ВСВ; *в)* прогностическое поле радиолокационной отражаемости, 9 ч ВСВ

### 3.5. Примеры моделирования мезомасштабных конвективных систем с опасными явлениями погоды

Для примера рассмотрены результаты моделирования трех случаев развития МКС, с которыми были связаны случаи наиболее интенсивных ОЯ на Западном Урале за последнее десятилетие: 18.07.2012 г. по северным районам края, 18.08.2014 г. в Чайковском районе, 24.06.2015 г. в центральных и восточных районах края [91]. Для исследования использовалась модель WRF с динамическим ядром ARW. В качестве начальных и граничных условий был использован реанализ модели NCEP-CFSv2. Таким образом, модель WRF запускалась в режиме диагноза или «квазипрогноза».

#### 3.5.1. Мезомасштабный конвективный комплекс 18 июля 2012 года

18 июля 2012 г. в период между с 7 до 13 ч ВСВ (рис. 3.8) через территорию Западного Урала с юга на север переместился усиливающийся мезомасштабный конвективный комплекс, сформировавшийся в теплом секторе углубляющегося южного циклона перед полярным холодным фронтом. Наблюдались сильные шквалы (20-28 м/с) с выпадением крупного града (до 22 мм) и сильными ливнями (до 36 мм/ч), которые нанесли значительный ущерб. Наиболее сильные шквалы наблюдались по северо-западным и северо-восточным районам Пермского края. Они не были зафиксированы метеостанциями, но вызвали массовые ветровалы В лесных массивах на общей площади около 24 тыс. га [44].



Рис. 3.8. Температура верхней границы облаков, 18.07.2012 г. в 10 ч ВСВ: *а*) по спутниковым данным MODIS, *б*) по модели WRF, расчет с шагом сетки 9 км, *в*) по модели WRF, расчет с шагом сетки 2 км.

По спутниковым данным MODIS, формирование МКК началось 18 июля 2012 г. в 06 ч 30 мин ВСВ в районе г. Янаул. Между 07 и 08 ч ВСВ усиливающийся конвективный кластер перемещался через юго-западные районы Пермского края, где были зафиксированы шквалы 23—28 м/с. Модель WRF воспроизводит появление двух скоплений Cb с  $H_{Bro}$  до 12 км над севером Башкортостана к 7 ч ВСВ, которые через час объединились в одну МКС. В дальнейшем, наблюдается смещение модельной траектории МКС примерно на 100 км к востоку относительно фактической траектории (рис. 3.8). При расчете с шагом 4 км, модель воспроизводит сильный шквалы (до 28 м/с) наблюдались в это время югозападнее, в районе г. Оса, где, в свою очередь, при расчете с шагом 2 км, модель воспроизводит сильный шквал (средняя скорость ветра > 25 м/с).



Рис. 3.9. Скорость ветра 18.07.2012 г. по модели WRF: *a*) в 9 ч ВСВ, *б*) в 10 ч ВСВ, *в*) в 11 ч ВСВ, *c*) в 12 ч ВСВ.

В дальнейшем по модели прогнозировалось увеличение площади МКК и смещение зоны интенсивной конвекции на северо-запад Пермского края. Расчетная скорость ветра при шквалах оказывается несколько ниже фактической (до 21 *м/c*), в то время как метеорологическими станциями зафиксирован шквал 28 *м/c* в г. Глазов и 24 *м/c* в г. Кудымкар, где он наблюдался на 1 ч раньше. В целом траектория прохождения МКК и интенсивность осадков (до 30 *мм/ч*) успешно воспроизводятся моделью. Результат моделирования скорости ветра при шквале также можно считать удовлетворительным. Однако по модели наиболее сильные шквалы прогнозировались в центральных районах Пермского края, фактически же они наблюдались по северу территории.

Также модель не воспроизводит формирование во второй половине дня над восточной частью Пермского края еще одной МКС — линии шквалов. Это связано со смещением траектории основного конвективного кластера на восток, в сравнении с фактическим его положением (рис. 3.9). Таким образом, в данном случае модель WRF могла быть использована для прогноза времени прохождения МКК с развитием опасных явлений с точностью  $\pm 1$  *ч*. Однако пространственное положение зон сильных шквалов не совпадает с фактическим. Сильный шквал (25 *м/c*) и крупный град прогнозировался в этот день и синоптиками Пермского ЦГМС.

#### 3.5.2. Мезомасштабный конвективный комплекс 17 августа 2014 года

17 августа 2014 г. в Чайковском районе Пермского края наблюдался локальный сильный шквал, который не был зафиксирован метеостанциями, но нанес значительный ущерб, оцененный в 80 млн. *руб*. В результате шквала был повален лес на площади свыше 600 га, повреждено более 100 жилых домов и социально-значимых объектов в нескольких населенных пунктах. По результатам обследования, проведенного специалистами Пермского ЦГМС, скорость ветра при шквале в 60 км юго-восточнее г. Чайковский составила не менее 28 m/c. Шквал сопровождался выпадением града диаметром около 20 мм. Шквал наблюдался на южной периферии мезомасштабного конвективного

комплекса, который был связан с волновым возмущением на малоподвижном полярном фронте, ориентированном с юго-запада на северо-восток. На изобарической поверхности 300 гПа ему соответствовало струйное течение, скорость ветра в котором превышала 40 *м/с*.

Мезомасштабный конвективный комплекс сформировался около 08 ч ВСВ над территорией Татарстана, и к 9 ч 10 *мин* ВСВ находился в 100 км северовосточнее г. Казань. Затем данный МКК сместился на южные районы Удмуртии и Пермского края, где достиг стадии максимального развития. При его прохождении на метеорологических станциях городов Ижевск и Чайковский отмечались ливневые дожди с грозой и усиление ветра до 17—19 m/c. Конвективная ячейка с мезоциклоном, которая вызвала разрушительный шквал, сформировалась южнее г. Чайковский на периферии МКК в 12 ч 50 *мин* ВСВ и достигла стадии максимального развития в 13 ч ВСВ. По данным ДМРЛ, Н<sub>вго</sub> в это время составила 14—15 км. Мезоциклонический вихрь просуществовал около 20 *мин*, после чего разрушился.

По модели WRF (с шагом сетки 3 *км*) успешно воспроизвелась траектория прохождения МКК и связанных с ним сильных шквалов (до 35 *м/c*) на юге Пермского края (рис. 3.10). Однако шквал в Чайковском районе по модели прогнозировался в 11 *ч* ВСВ (фактически же он наблюдался в 13 *ч* ВСВ). По модели также прогнозировались сильные шквалы (до 30—35 *м/c*) севернее г. Чернушка и в Октябрьском районе Пермского края в 12—13 ч. ВСВ. Фактически сильные шквалы в этих районах не зафиксированы, был отмечен только град диаметром до 2 *см*.

В 09 ч 10 мин ВСВ расхождение фактического (определенного по спутниковым данным MODIS) и расчетного положения МКС составляло около 150 км. Скорость перемещения МКС по модели также оказалась несколько выше фактической, в связи с этим ошибка прогноза времени ее прохождения в дальнейшем только увеличивалась. После 16 ч ВСВ через южные районы Пермского края переместилась вторая МКС, с которой также были связаны интенсивные

грозы, ливневые осадки и шквал до 21 *м/с*. Однако моделью данная МКС не воспроизводится.



Рис. 3.10. Скорость порывов ветра 17.08.2014 г. по модели WRF: *a*) в 9 ч ВСВ, *б*) в 10 ч ВСВ, *в*) в 11 ч ВСВ, *г*) в 12 ч ВСВ.

С учетом перечисленных несоответствий прогностических и фактических данных, можно отметить, что модель WRF и в этом случае могла быть использована для прогноза сильного шквала, поскольку траектория прохождения МКС и скорость порывов ветра определены с высокой достоверностью. В то же время, синоптики Пермского ЦГМС в этот день опасных явлений погоды не прогнозировали (ожидались грозы с усилением ветра до 17-22 m/c).

#### 3.5.3. Мезомасштабный конвективный комплекс 24-25 июля 2015 года

Вечером 24 и в ночь на 25 июня 2015 г. через территорию Пермского края переместился МКК с сильными ливнями, шквалами и градом. В ночь на 25 июня на метеостанции Губаха выпало 117 *мм* осадков, что привело к размыву участка путей на Свердловской железной дороге и другим разрушениям [58].



Рис. 3.11. Начало формирования МКС 24.06.2015 г. над территорией Удмуртии: *a*) температура ВГО по данным модели WRF в 10 ч ВСВ; *б*) температура ВГО по спутниковым данным MODIS, в 09 ч 20 *мин* ВСВ

Формирование МКК началось в 9 ч ВСВ над территорией Удмуртии на полярном холодном фронте у вершины волнового циклона, который медленно смещался с юго-запада на северо-восток. В последующие несколько часов МКК усиливался и смещался на северо-восток. В период между 13 и 14 ч ВСВ он достиг стадии максимального развития. В районе г. Пермь по данным ДМРЛ зафиксированы сильные шквалы, а Н<sub>вго</sub> превышала 14 км. Наблюдавшийся в это время шквал в г. Перми нанес значительный ущерб. В ночь на 25 июня МКК стационировал над западным склоном Среднего Урала и вызвал здесь сильные продолжительные ливни (выпало до 117 мм осадков).



Рисунок 3.12. МКК над Западным Уралом в 17 ч ВСВ 24.06.2015: а) количество выпавших осадков за 24 ч по результатам счета модели WRF; б) температура ВГО по результатам счета модели WRF; в) температура ВГО по спутниковым данным MODIS.

По модели WRF прогнозировалось формирование зоны активной конвекции над территорией Удмуртии вблизи границы Пермского края с 9 u BCB 24 июня 2015. Через час модель воспроизводит уже достаточно крупный конвективный кластер с Н<sub>вго</sub> до 13 *км* и температурой ВГО до  $-60 \,^{\circ}C$ , что в целом соответствует данным спутниковых наблюдений (рис. 3.11). В последующие часы скорость смещения данной МКС на северо-восток по модели оказалась завышенной. Так, по модели ливневые осадки (до 30 *мм/ч*), град и усиление ветра в районе Перми прогнозировались в 12 u BCB, фактически шквал с градом в Перми прошел в 13 u 30 *мин* BCB, т.е. на полтора часа позже. Кроме того, модель прогнозировала сильные ливни (до 60 *мм* осадков) и град в обширной зоне от Кудымкара до Березников, которые фактически не зафиксированы метеостанциями.

Модель воспроизводит сильные ливни (30-70 мm/12 ч) на западном склоне Среднего Урала в ночь на 25 июня, однако интенсивность осадков оказывается ниже фактической (117 мm/12 ч)). Одна из областей интенсивных осадков (до 65 мm) по модели располагалась в 20 кm юго-восточнее г. Губаха. Пространственное положение МКС и зон интенсивных осадков по модели в 17 ч ВСВ 25 июня оказывается близким к фактическому, но площадь МКС по модели г. Губаха в счет облачности верхнего яруса (рис. 3.11).

Таким образом, по модели WRF-ARW мог быть дан сверхкраткосрочный прогноз сильных ливней (≥30 *мм/ч*), града и шквалов во второй половине дня 24 июня и в ночь 25 июня с точностью оценки времени наступления ОЯ ±2 *ч*. Однако осадки экстремальной интенсивности (более 100 *мм*/12 *ч*) спрогнозированы не были.

### 3.6. Использование вложенных расчетных областей для прогноза мезомасштабных конвективных систем.

Модель WRF с динамическими ядрами ARW и NMM поддерживает возможность проведения расчетов на вложенных расчетных областях. Руководство по экспликации модели рекомендует повышать детальность на вложенных расчетных областях в 3 или 5 раз [106], что влечет за собой необходимость уменьшения шага по времени в такое же количество раз, что приводит к существенному увеличению расхода вычислительных ресурсов. Такой подход позволяет постепенно усваивать начальные и граничные условия (данные глобальных прогностических моделей), что повышает качество воспроизведения мезомасштабных метеорологических процессов.

В большинстве случаев на материнской расчетной области целесообразно прибегать к процедурам параметризации конвективных процессов и моделировать конвективные течения напрямую только на вложенных расчетных областях начиная с пространственного разрешения 3—5 км [33, 45]. Такой подход позволяет улучшить качество прогноза количества выпавших осадков.

Так как МКС успешно воспроизводятся моделью в режиме прямого моделирования конвекции уже на сетках с пространственным разрешением 12 *км* и менее, целесообразно воспроизводить конвективные течения напрямую как на вложенных, так и на материнских расчетных областях. Это позволит улучшить качество воспроизведения метеорологических явлений, связанных с развитием МКС (скорость ветра при шквале, зоны выпадения интенсивных осадков и града).

Для модели WRF существует два варианта использования вложенных расчетных областей: с обменом данными между доменами и без него. В первом случае результаты расчета на вложенном домене оказывают влияние на результаты расчета на материнском домене. Во втором случае результаты расчета на материнском домене являются граничными и начальными условиями для расчета на вложенной расчетной области. Кроме того, для варианта с обменом данными между доменами существует возможность сглаживания результатов расчета на материнской расчетной области вблизи границ вложенного домена.

Для модели WRF были подобраны конфигурации расчетных областей с вложением (табл. 3.7). В качестве параметризаций процессов подсеточного масштаба для динамических ядер ARW и NMM использованы рекомедуемые руководством по экспликации модели WRF с динамическим ядром NMM для моделирования атмосферных процессов в средних широтах. Параметризация глубокой конвекции не использовалась на расчетных областях всех уровней, производилось непосредственное воспроизведение конвективных течений.

Качество воспроизведения МКС моделью WRF-ARW с использованием вложенных расчетных областей было оценено на трех случаях возникновения МКС с ОЯ: 21 июня 2012 г., 18 июля 2012 г. и 24 июня 2015 г.

Таблица 3.7

#### Характеристика материнских и вложенных расчетных областей,

Характеристика	Принятая настройка, ARW	Принятая настройка, NMM		
Шаг сетки	9 км/3 км/1 км	0.0459×0.045°/0.0153×0.015°		
Число узлов	333×333/400×400/400×400	200×380/200×380		
Число вертикальных	42	42		
уровней				
Модель рельефа	U.S. Geological Survey (USGS)	U.S. Geological Survey (USGS)		
	DEM (30s)	DEM (30s)		
Срок прогноза	15,27,39 ч	15,27,39 ч		
Временной шаг вывода	1 4	1 <i>ч</i>		
данных				
Динамическое ядро	ARW	NMM		
Шаг интегрирования по	36 c/12 c/4 c	12 c/ 4c		
времени				
Начальные и граничные	Прогноз (реанализ) моделей	Прогноз (реанализ) моделей		
условия	GFS и CFS	GFS и CFS		
Микрофизика облачно-	Схема Томпсона	Схема Томпсона		
сти				
Планетарный погра-	Схема Меллора-Ямады-Янича	Схема Меллора-Ямады-Янича		
ничный слой	(Eta)	(Eta)		
Подстилающая поверх-	Модель Noah	Модель Noah		
ность				
Коротковолновая и	Схема GFDL (Eta)	Схема GFDL (Eta)		
длинноволновая радиа-				
ция				
Приземный слой	Схема Монина-Обухова с вяз-	Схема Монина-Обухова с вяз-		
	ким подслоем Карлсона-Боланда	ким подслоем Карлсона-		
	и стандартными функциями по-	Боланда и стандартными функ-		
	добия	циями подобия		
Конвекция	Прямое моделирование (без па-	Прямое моделирование (без		
	раметризации)	параметризации)		

#### для динамических ядер NMM и ARW

МКС 21 июня 2012 г. воспроизвелась со сдвигом по времени на 2 ч (рис. 3.13) и к 18 ч ВСВ (моменту спутниковой съемки) находилась в стадии диссипации (как и в случае без использования вложенных расчетных областей).

Однако, качество воспроизведения связанных с ней явлений существенно улучшилось. При включенном обмене данными между расчетными областями МКС не воспроизводится вообще.



Рис. 3.13. Результаты моделирования МКС 21.06.2012 г.: *а)* фактические значения температуры ВГО по спутниковому снимку MODIS в 18 ч ВСВ 21.06.2012; *б)* температура ВГО по модели WRF с шагом сетки 3 *км* с использованием вложенных областей; *в)* температура ВГО по модели WRF с шагом сетки 3 *км* без использования вложенных областей

Значительно улучшилось и качество воспроизведения явлений для случая МКС 18 июля 2012 г. В частности, воспроизвелись шквалы в районе г. Оса (33 m/c), г. Лысьва (27 m/c), п.г.т. Полазна (29 m/c), которые ранее не воспроизводились моделью. Однако модель по-прежнему воспроизводит формирование МКС, с которой были связаны шквалы на северо-востоке Пермского края значительно ранее ее фактического появления, что приводит к ложным тревогам в центральных районах края. Качество воспроизведения шквалов, вызвавших масштабные ветровалы на западе и северо-западе Пермского края, оценивается как удовлетворительное.

Качество воспроизведения МКС 24 июня 2015 г. осталось неизменным. Успешно воспроизводится выход МКС на центральные районы Пермского края, однако не воспроизводится длительное стационирование МКС на восточными районами края, где выпало до 117 *мм* осадков за 12 *ч* (метеостанция Губаха).

Таким образом, применение вложенных расчетных областей в некоторых случаях позволяет существенно улучшить качество прогноза МКС, в частности, связанных с ними опасных явлений. Недостатком такого подхода является существенное увеличение расхода вычислительных ресурсов (процессорного времени, потребленного объема дисковой и оперативной памяти), поэтому расчет прогноза с использованием вложенных расчетных областей должен осуществляться исключительно с применением высокопроизводительных вычислительных систем.

#### 3.7. Выводы по главе 3

1. Прямое моделирование конвекции обеспечивает получение более качественного прогноза, чем использование любой из предложенных в модели схем параметризации конвекции.

2. Модель WRF с динамическими ядрами ARW и NMM без использования вложенных расчетных областей и высоким пространственным разрешением в большинстве случаев воспроизводит MKC со смещением по времени или по пространству, что можно объяснить начальными условиями (ошибками в данных модели GFS и реанализа CFS). Кроме того, во внутримассовых ситуациях MKC зачастую не воспроизводятся вообще. Положение зон сходимости по данным глобальных моделей часто определяется с ошибкой в 50—100 км и более, что приводит к ошибкам при прогнозе места и времени возникновения MKC по мезомасштабной модели. Таким образом, качество прогноза может повышаться

по мере совершенствования глобальных моделей. Для получения сверхкраткосрочного прогноза перспективы повышения надежности связаны также с ассимиляцией дополнительных данных с помощью системы трехмерного усвоения WRFDA-3DVAR.

3. Применение вложенных расчетных областей в некоторых случаях позволяет улучшить качество воспроизведения связанных с МКС опасных явлений, таких как сильные ливни (дожди) и сильные шквалы. Однако, такой подход приводит к существенному увеличению расхода вычислительных ресурсов.

4. В ряде случаев модель WRF успешно воспроизводит формирование MKC с сильными шквалами, крупным градом и сильными ливнями, поэтому применение ее для сверхкраткосрочного прогноза конвективных опасных явлений с точностью по времени ± 1—2 ч представляет определенный интерес, несмотря на большой процент неоправдавшихся прогнозов.

# 4. ПРОГНОЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ С СИЛЬНЫМИ СМЕРЧАМИ

# 4.1. Примеры моделирования мезомасштабных конвективных систем с сильными смерчами 7 июня 2009 года и 29 августа 2014 года

Смерчи представляют собой одно из наиболее редких и опасных явлений погоды, наблюдающихся в умеренных широтах. В силу локального характера и небольшой продолжительности существования, большинство случаев смерчей не фиксируется сетью метеостанций. Информация о факте прохождения смерча чаще всего поступает от непосредственных очевидцев явления, а также на основе анализа нанесенного ущерба.

Первая систематизация сведений о смерчах на территории бывшего СССР была выполнена А.И. Снитковским в 1987 г. [47], по данным которого максимальная повторяемость смерчей характерна для территории Беларуси и Прибалтики, а наиболее сильные смерчи (категорий интенсивности EF3—EF4 по шкале Фуджиты-Пирсона [82, 114]) наблюдались в основном в Центральной России. Также им отмечено, что данные о случаях смерчей в малонаселенных районах (к числу которых можно отнести северную и восточную часть Европейской территории России) являются неполными и нерепрезентативными, по причине неоднородности распределения плотности населения и ряда наблюдений.

Большинство смерчей в Европейской части России, как и в Европе в целом, характеризуются малой интенсивностью (EF0—EF1) и небольшим ущербом. Основной ущерб связан с сильными смерчами (категории EF2 и выше), которые наблюдаются достаточно редко. По данным [85], из 3818 случаев

смерчей, зафиксированных на территории Европы, только 335 случаев имели интенсивность EF3 и выше. В свою очередь в базе данных А.И. Снитковского приведена информация о девяти случаях смерчей категорий интенсивности EF3—EF4, наблюдавшихся на территории бывшего СССР [47]. Наиболее сильные смерчи за всю историю наблюдений в России были зафиксированы 9 июня 1984 г. Данное событие известно как 1984 Ivanovo tornado outbreak или 1984 Soviet Union tornado outbreak, а его детальный анализ представлен в работе [81].

В последние годы сильные смерчи на территории России, вызвавшие человеческие жертвы и масштабные разрушения, были зафиксированы в Московской области (3 июня 2009 г. и 13 июля 2016 г.), а также в Предуралье 29 августа 2014 г. Их интенсивность достигала EF3 по шкале Фуджиты-Пирсона [79]. Эти случаи привлекли большое внимание со стороны как научного сообщества, так и средств массовой информации. В частности, исследованию условий формирования сильного смерча на севере Башкортостана 29 августа 2014 г. посвящены работы [68, 75, 100]. Кроме того, детально были изучены случаи смерчей в Ханты-Мансийске и Обнинске, наблюдавшиеся в 2012 и 2013 гг. [93, 100]. Также в последние годы в России наблюдался ряд других сильных смерчей и торнадо-вспышек. Однако они наблюдались в малонаселенных районах и не вызвали больших материальных потерь, за исключением ущерба для лесного хозяйства [57].

Таким образом, исследование условий возникновения сильных смерчей на территории России и оценка возможностей их прогнозирования на фоне растущей интенсификации конвективных процессов в умеренных широтах, вызванной современным потеплением климата [67, 74, 93], остается весьма актуальной задачей.

По многолетним данным, в Уральском регионе смерчи наблюдаются в 10 раз реже, чем сильные шквалы (со скоростью ветра ≥25 *м/c*). На территории Пермского края в период с 1990 по 2015 гг. отмечено 6 случаев смерчей. В большинстве случаев это слабые смерчи (EF0—EF1 по шкале Фуджиты-

Пирсона), длина пути которых не превышала 25 км. Тем не менее, за последние годы в Предуралье зафиксированы два случая сильных смерчей, приведших к значительным разрушениям. Они наблюдались 7 июня 2009 г. на северо-западе Пермского края и 29 августа 2014 г. в Башкортостане [57]. Длина пути этих смерчей превышала 50 км, а ширина полосы разрушений — 500 м.

Поскольку смерчи крайне редко фиксируются наблюдательной сетью, для оценки их интенсивности обычно используют данные об ущербе. Для территорий с низкой плотностью населения и значительной залесенностью одним из основных видов ущерба от смерчей являются ветровалы в лесных массивах. По контурам ветровалов может быть определена траектория прохождения смерча и получена ориентировочная оценка его интенсивности.

Для исследования использовалась модель WRF с динамическим ядром ARW. В качестве начальных и граничных условий был использован реанализ модели NCEP-CFS. Таким образом, модель WRF запускалась в режиме диагноза или «квазипрогноза».

#### 4.1.1. Характеристика рассматриваемых случаев смерчей

Смерчи 7 июня 2009 г. прошли во второй половине дня через малонаселенную местность в Гайнском и Юрлинском районах Пермского края, а также в Усть-Куломском районе Республики Коми. Кроме смерчей, на территории Пермского края наблюдался крупный град диаметром до 33 *мм*; также отмечались шквалы со скоростью ветра 20—27 *м/с*, нанесшие значительный ущерб. Наблюдательной сетью или очевидцами смерчи зафиксированы не были. Траектория прохождения смерчей 7 июня 2009 г. была восстановлена по контурам ветровалов в лесных массивах. Ветровалы выявлены по результатам сопоставления разновременных снимков со спутников LANDSAT и SPOT-5, методика которого описана в работе [61]. Общая протяженность ветровалов от смерчей 7 июня 2009 г. составляет порядка около 110 км, ширина — от 200 до 600 м, суммарная площадь — 2,5 тыс. га. По спутниковым данным сверхвысокого разрешения выявляется характерная линейно-веерная форма ветровальных нарушений [61]. Форма ветровалов, а также их геометрические характеристики позволяют утверждать, что ветровал вызван прохождением именно смерча, а не шквала. Все полосы ветровалов от смерчей 7 июня 2009 г. попадают на одну прямую линию. Предположительно, все смерчи были связаны с прохождением одного суперячейкового кучево-дождевого облака.

Смерч 29 августа 2014 г. прошел путь длиной более 50 км по территории Краснокамского, Калтасинского и Янаульского районов Башкортостана [61]. Он сформировался ориентировочно в 11 ч 50 мин ВСВ в районе пос. Арлан, и смещаясь со скоростью около 40 км/ч, разрушился после 13 ч ВСВ северовосточнее г. Янаул. Помимо смерча, в регионе наблюдались шквалы с скоростью ветра до 26 м/с и град диаметром до 50 мм. В результате прохождения смерча имелись человеческие жертвы и масштабные разрушения. Факт прохождения смерча был подтвержден многочисленными фотографиями очевидцев. Смерч не был зафиксирован наблюдательной сетью, а на ближайшей метеостанции Янаул отмечен шквал 22 м/с. На основе анализа разновременных снимков со спутников серии LANDSAT проведено уточнение траектории движения смерча. Ширина полосы ветровала в лесных массивах, попавших под воздействие смерча, составляет 300—500 м., а характер разрушений в населенных пунктах позволяет отнести его к третьей категории интенсивности по шкале Фуджиты-Пирсона. Общая площадь ветровалов в подвергшихся воздействию смерча лесных массивов составила 140 га.

Для анализа смерчеопасной ситуации на синоптическом масштабе использовались различные индексы конвективной неустойчивости, используемые непосредственно для прогноза мезоциклонов (суперячеек) и смерчей. По данным реанализа CFS с шагом по времени 1 ч и шагом по пространству 0.5° рас-

считывались следующие параметры (табл. 4.1): доступная потенциальная энергия неустойчивости (SB CAPE), энергия противодействия конвекции (CIN), относительная завихренность в слое от земли до 3 км (SRH), индекс для прогноза сильных конвективных штормов (SWEAT), комплексный предиктор для прогноза суперячеек (SCP) и сдвиг ветра в слое 0,5—6 км (DLS). Как было показано в главе 1, развитие суперячейковых штормов и смерчей вероятно при значениях DLS  $\geq$  35, SRH  $\geq$  150, SWEAT  $\geq$  400 и SCP  $\geq$  1 (табл. 4.1).

Таблица 4.1.

	7.06.	.2009	29.08.2014		
Параметр	Гайны, 10—11 <i>ч</i>	Максимум,	Янаул, 12—13 ч	Максимум,	
	BCB	10—12 ч ВСВ	BCB	12—13 ч ВСВ	
САРЕ, Дж/кг	300400	16001800	500600	8001000	
CIN, Дж/кг	-5075	050	-5075	-2550	
SRH $M^2/c^2$	200250	250300	200250	350400	
SCP	11.5	2.53	2.53	45	
SWEAT	250300	350400	350400	400450	

Показатели вероятности развития суперячейковых штормов 07.06.2009 г. и 29.08.2014 г., рассчитанные по данным реанализа CFS

#### 4.1.2. Анализ смерчеопасной ситуации 7 июня 2009 года

Синоптическая ситуация в регионе 7 июня 2009 г. в целом определялась теплым сектором высокого циклона с центром над Костромской областью. В средней тропосфере ему соответствовала передняя часть высотной ложбины, ось которой была ориентирована со Скандинавии на центральную часть Европейской России. Скорость ветра в средней тропосфере достигала 30 *м/с*. В первой половине дня на территории Удмуртии и Кировской области располагался сдвоенный меридионально ориентированный малоподвижный полярный фронт, вдоль которого перемещались волновые возмущения. Одно из них, сместившись на север Пермского края, к 12 *ч* ВСВ оформилось в частный циклон с замкнутой изобарой 1005 *гПа*. С теплым сектором циклона на Зауралье и Запад-

ную Сибирь поступала тропическая воздушная масса с максимальной температурой +29...+32°С и температурой точки росы у земли +8...+10°С. За холодным фронтом максимальная температура была в пределах +17...+19°С, т.е. контраст температур на фронте достигал 12—15°С. Днем 7 июня холодный фронт начал медленно смещаться на восток-северо-восток. К вечеру 7 июня скорость его смещения увеличилась, и он пересек территорию Пермского края. С прохождением волновых возмущений на фронте и был связан комплекс опасных явлений погоды: шквалы 20—25 m/c, крупный град и смерч.

По данным реанализа по модели CFS, в период между 10 и 12 ч ВСВ 07.08.2009 г. в центральных и юго-западных районах Пермского края складывалась смерчеопасная ситуация, обусловленная сильной конвективной неустойчивостью атмосферы (энергия неустойчивости составляла 1600—1800 Джс/кг) и сдвигом ветра (индекс SWEAT достигал 350—400). Фактически смерч прошел через северо-западную часть Пермского края, а в центральных и юго-западных районах наблюдались только шквалы со скоростями ветра 20—25 м/с и крупный град. Результаты расчетов индексов неустойчивости по данным реанализа CFS в районах формирования смерча и выпадения крупного града приведены в табл. 4.1.

На снимке Aqua MODIS в 09 u 25 *мин* ВСВ 7 июня 2009 г. вдоль границы Пермского края и Кировской области на холодном фронте наблюдалась линейная система кучево-дождевых облаков (рис. 4.1). Наиболее мощная конвективная ячейка диаметром около 30 *км* и с температурой верхней границы облака до  $-62^{\circ}$ С, на момент съемки находилась у западной границы Юрлинского района Пермского края, в 20 *км* юго-западнее точки начала первого смерчевого ветровала. Траектория дальнейшего смещения данной ячейки, проложенная по потоку, совпадает с траекторией прохождения смерча. Таким образом, с высокой вероятностью можно утверждать, что смерч был связан с этой ячейкой и наблюдался в период между 9 u 30 *мин* и 11 u 30 *мин* ВСВ.



Рис. 4.1. МКС со смерчем 7.06.2009 г. – Расчетная радиолокационная отражаемость по модели WRF в 9 *(слева)* и 10 ч *(по центру)* ВСВ; температура верхней границы облаков по данным Aqua MODIS на 9 ч 25 *мин* ВСВ *(справа)*.

По данным модели WRF (расчет выполнялся на сетке 4  $\kappa m$ ), начало формирования мезомасштабной конвективной системы, вызвавшей смерч на северо-западе Пермского края, прогнозировалось еще в 7 ч ВСВ над территорией Удмуртии. Возникновение МКС, очевидно, было связано с волновым возмущением на фронте. Дальнейшая траектория смещения МКС воспроизводится моделью с высокой степенью достоверности (рис. 4.1). Однако опасных явлений погоды (сильных осадков, крупного града) при ее прохождении модель не прогнозировала. Интенсивность осадков не превышает 5 mm/4, выпадение града также не прогнозировалось. Расчетная высота верхней границы Cb (H<sub>BFO</sub> Cb) не превышала 10  $\kappa m$ .

При прохождении волновых возмущений на фронте через юго-западные и центральные районы Пермского края на вторую половину дня по модели WRF прогнозировалось формирование еще двух долгоживущих МКС с  $H_{BFO}$  Cb до 12 км, с сильными осадками (до 15—20 мм/ч), градом (до 5 мм осадков в виде града) и шквалами к северу и к западу от г. Перми, а также западнее г. Березники (табл. 4.2). Фактически крупный град диаметром около 3 см выпал в Большесосновском и Нытвенском районах в период между 11 и 12 ч ВСВ, шквалы со скоростью ветра 25—27 *м/с* зафиксированы в Усольском районе и на гидропосте Усть-Игум. По данным метеостанции Верещагино в период между 11 и 12 ч ВСВ наблюдался смерч.

Таблица 4.2

# Характеристика достоверности прогноза опасных явлений погоды

Дата,	Район наблюдения	Вид и	Н <sub>ВГО</sub> и	Прогноз по модели
срок	ОЯ (КНЯ)	интенсивность	метеоявления	WRF
(BCB)		явления	по данным	
			МРЛ	
09.30—	Юрлинский, Гайн-	Смерч (длина пу-	Нет данных	Конвективная ячейка
11.30	ский районы Перм-	ти 110 км, шири-		с осадками до 5 мм/ч,
	ского края	на до 600 м)		отражаемость до 50
	-			dBz
11.00	Метеостанция	Град диаметром	Конвективная	Отсутствие конвек-
	Большая Соснова	33 мм	ячейка с гра-	тивных явлений
			лом. Наго	
			13 км	
11.00—	Метеостанция	Град диаметром		Конвективная ячейка
12.00	Ножовка	20—30 <i>мм</i> , шквал		с осадками до 5 мм/ч,
		20—24 м/с		отражаемость до 50
				dBz
11.00—	Нытвенский район	Град диаметром	Конвективная	МКС с отражаемо-
13.00	1	30 мм	ячейка с гра-	стью ло 55 $dB_{Z}$ , силь-
			лом. Наго	ными ливнями (ло 16
			13 км	MM/Y), rpanom (no 4 $MM$
			20 1017	осалков в виле грала)
11.00—	Метеостаниия	Смерч		Отсутствие конвек-
12.00	Верещагино	1 -		тивных явлений
11.00—	Метеостанция	Шквал 20 м/с.		Локальная конвектив-
12.00	Лысьва	град		ная ячейка с отражае-
		1 / 1		мостью до 45 DBz
13.00	Метеостанция	Шквал 20 м/с		МКС с отражаемо-
	Пермь			стью до 55 $dB_{Z}$ , силь-
	1			ными ливнями (до 16
				<i>мм/ч</i> ). гралом (ло 4 <i>мм</i>
				осалков в виде града)
Нет лан-	Усольский район.	Шквал до 25—27	Нет данных	МКС с отражаемо-
ных	г. Березники. пост	м/с		стью до 60 <i>dB</i> 7. силь-
	Усть-Игум			ными ливнями (до 20
				<i>мм/ч</i> ), гралом (ло 5 <i>мм</i>
				осалков в виле грала)
				очидков в виде града)

#### 07.06.2009 г по модели WRF на сетке с горизонтальным разрешением 4 км

Таким образом, развитие МКС с локальными шквалами и градом над центральными и юго-западными районами края в целом успешно воспроизводятся моделью с ошибкой по времени прохождения  $\pm 1$  ч. Однако траектория прохождения МКС по модели несколько смещена к востоку относительно ее фактической траектории. Так, по модели наибольшая интенсивность конвективных явлений ожидалась в 13 ч ВСВ к северу от г. Перми, фактически же крупный град выпал на час раньше, и к западу от города. Расчет на сетке 2 км воспроизводил МКС, с которой был связан смерч, с той же интенсивностью, что и на сетке 4 км. В то же время прогноз интенсивности двух других МКС существенно изменился (возросли отражающая способность, скорость ветра и интенсивность осадков).

#### 4.1.3. Анализ смерчеопасной ситуации 29 августа 2014 года

Синоптическая ситуация над восточной частью Европейской России 29.08.2014 г. определялась высотной циклонической депрессией, расположенной над севером ЕТР, и высотным гребнем, ориентированным с района Каспийского моря на Зауралье. На этом фоне с Нижнего Поволжья на Татарстан, а затем на Удмуртию смещался углубляющийся юго-западный циклон. В 0 u ВСВ центр циклона располагался над Тамбовской областью, а в 12 u ВСВ он находился уже над Татарстаном. Давление в его центре упало ниже 995  $c\Pi a$ , а скорость падения в центре циклона достигала 2.5  $c\Pi a/u$ . Циклон сформировался на сдвоенной фронтальной зоне и в его теплом секторе на Урал осуществлялся вынос тропической воздушной массы с температурой на изобарической поверхности 850  $c\Pi a$  до +22°C. В то же время в тыл циклона поступала воздушная масса с температурой на изобарической поверхности 850  $c\Pi a$  около +6..+8°C. На высоте над циклоном располагалось мощное струйное течение, ориентированное с юго-запада на северо-восток, а скорость ветра в средней

тропосфере достигала 40 *м/с*. К 12 *ч* ВСВ начался процесс окклюдирования, точка окклюзии полярного фронта проходила через северо-западные районы Башкирии.

Смерчеопасная ситуация складывалась в период с 12 до 13 *ч* ВСВ у точки окклюзии полярного фронта в северных районах Башкирии и на крайнем юге Пермского края. Она была обусловлена сильным сдвигом ветра в теплом секторе циклона на фоне умеренной неустойчивости атмосферы (САРЕ составляла 800—1000 Дж/кг). Значение индекса SWEAT достигало 450 (табл. 4.1).

По данным ДМРЛ, установленного в г. Ижевск, в 7 ч 40 *мин* ВСВ к югозападу от г. Бирск образовался первый суперячейковый шторм с  $H_{BFO}$  Сb до 14 км, который достиг максимального развития в период между 8 ч и 9 ч ВСВ, смещаясь через Дюртюлинский район Башкортостана. С его прохождением отмечался град диаметром до 40 *мм*. Второй, более мощный суперячейковый шторм (также с  $H_{BFO}$  до 14 км) сформировался около 11 ч ВСВ южнее г. Мензелинск, и смещался по потоку через Нефтекамский, Калтасинский и Янаульский районы Башкортостана на юг Пермского края. Максимального развития он достиг около 12 ч ВСВ к юго-востоку от Нефтекамска. С его прохождением был связан смерч, крупный град диаметром до 50 *мм* и шквал до 22 *м/с*. В период с 13 ч до 16 ч ВСВ суперячейка эволюционировала в МКС квазиокруглой формы диаметром около 150 км, которая сместилась на восточные районы Пермского края и вызвала сильные ливневые дожди (до 40 *мм*).

По расчету модели WRF на сетке 4 км развитие опасных конвективных явлений в теплом секторе циклона над севером Башкортостана не прогнозировалось. К 13 ч ВСВ ожидалось смещение с северо-запада Башкортостана на юг Пермского края линейной системы Cb с высотой верхней границы не более  $10 \ \kappa m$ , умеренными ливнями до 8  $\ mm/4$ , выпадение града и развитие шквалов не прогнозировалось. Модель также не воспроизводит сильные ливни в восточных районах Пермского края (расчетная интенсивность осадков не превышает 5—  $10 \ mm/4$ ). Вероятно, это вызвано недооценкой неустойчивости атмосферы в

условиях значительной облачности, слабого дневного прогрева (максимальная температура +21...+24°С) и наличия задерживающих слоев.

## 4.2. Прогноз мезомасштабных конвективных систем со смерчами с применением вложенных расчетных областей

В связи с улучшением качества воспроизведения моделью WRF опасных явлений, связанных с МКС (п. 3.6), возникла необходимость пересчета описанных ранее случаев возникновения МКС со смерчами с использованием вложенных расчетных областей. Кроме того, использованный алгоритм был применен для прогноза МКС со смерчами, наблюдавшимися на Урале в 2017 г. (3 июня, Свердловская область и 18 июня, Курганская область). Описание условий развития МКС со смерчами 7 июня 2009 г. и 29 августа 2014 г. приведено в п. 4.1.2—4.1.3.

#### 4.2.1. Условия развития шквалов и смерчей 3 июня 2017 года

Погодные условия на Урале 3.06.2017 г. определяла передняя часть обширного высотного циклона с центром над южными районами Архангельской области. В тыловой части циклона на Европейскую территорию России поступала арктическая воздушная масса, с температурой на изобарической поверхности 850 гПа –4...–6°С. В то же время над Западной Сибирью господствовал высотный гребень. По его западной периферии распространялся тропический воздух с температурой на изобарической поверхности 850 гПа до +18°С. Уральский регион находился под влиянием меридионально ориентированной высотной фронтальной зоны, в пределах которой градиент температуры на изобарической поверхности 850 гПа превышал 12°С /500 км.
Днем 2.06.2017 г. к западу от Аральского моря на холодном фронте полярной системы сформировался южный циклон, который стал смещаться вдоль потока с юга на север. В связи с поступлением в тыловую часть холодного воздуха циклон начал интенсивно углубляться. К 12 ч ВСВ 3 июня давление в центре циклона, который сместился в район Магнитогорска, упало до 988 гПа. В ночь на 4 июня циклон достиг стадии максимального развития. Давление в его центре понизилось до 987 гПа. Циклон смещался меридионально вдоль Уральского хребта, и его центр к 3 ч ВСВ 4 июня располагался над юго-востоком Республики Коми.

Во второй половине дня 3 июня западные части Свердловской и Челябинской областей оказались под влиянием полярного фронта с волнами. Вечером 3 июня полярный фронт как холодный начал смещаться на восток. Восточная часть Зауралья находилась в теплом секторе южного циклона, где максимальная температура воздуха достигла +29...+31°C. В то же время за холодным фронтом (на востоке Пермского края) было всего +16°...+20°C. Таким образом, температурный контраст на фронте превышал 10° С.

Таблица 4.3

Дата, время	САРЕ, Лж/кг	Lifted Index. °C	Storm Relative Helicity (в слое 0-3 км). $m^2/c^2$	Energy Helicity	Supercell Com- posite Parameter
-1		, _		Index	r
03.06.2017, 12.00 BCB	2200/1800	-8/-4	480/360	4,2/2,5	0/0
18.06.2017, 12.00 BCB	4200/3000	-12/-8	450/560	3,4/5,0	3,5/3,4

Параметры неустойчивости атмосферы по данным моделей GFS/NCEP (в числителе) и GEM/CMC (в знаменателе)

По данным глобальных моделей атмосферы GFS/NCEP и GEM/CMC, в период с 9 до 15 ч ВСВ на Среднем Урале ожидались благоприятные условия для развития опасных явлений погоды. Прогнозировалось сочетание сильной конвективной неустойчивости (потенциальная энергия неустойчивости САРЕ составляла около 2000 Дж/кг) и сильной вертикальной завихренности. Прогнозируемое значение индекса смерчеопасности ЕНІ, который учитывает как неустойчивость, так и завихренность, по данным модели GFS достигло 4,2. В то же время, достаточным для развития сильных смерчей считается значение ЕНІ, превышающее 2,0 [71, 103]. Максимальные значения параметров неустойчивости и завихренности по данным на 12 ч ВСВ в радиусе 100 км от места формирования смерчей приведены в табл. 4.3. Более подробная информация об использовании этих параметров представлена в работе [76].

Неустойчивость атмосферы реализовалась днем 3 июня при прохождении волновых возмущений на полярном фронте. В 7 ч ВСВ был зафиксирован шквал (20 m/c) на метеостанции Карталы в Челябинской области. В последующие два часа шквалы наблюдались в ряде районов Челябинской области, а на метеостанции Мирный выпал крупный град диаметром 35 *мм*. В 8 ч 40 *мин* ВСВ по спутниковым данным MODIS над Челябинской областью наблюдалась линейная МКС протяженностью около 300 км, с радиояркостной температурой верхней границы облаков (ВГО) до  $-62^{\circ}$ С. Над северо-востоком Башкортостана смещалась еще одна конвективная ячейка диаметром 30 *км* с температурой ВГО до  $-61^{\circ}$ С. Такие значения температуры ВГО указывают на высокую интенсивность конвекции и возможный пробой тропопаузы (overshooting top) [61]. Третья МКС сформировалась к 10 ч ВСВ вблизи границы Пермского края и Свердловской области южнее г. Качканар, температура ВГО в ней также была ниже  $-60^{\circ}$ С. На метеостанции Бисер при прохождении МКС выпал град диаметром 32 *мм*.

## 4.2.2. Условия развития шквалов и смерчей 18 июня 2017 года

Синоптическая ситуация 18 июня 2017 г. была во многом аналогична той, которая наблюдалась 3 июня. Восточная часть Уральского региона находилась

под влиянием меридионально ориентированной ВФЗ в передней части высотного циклона с центром над Поволжьем. Через восток Курганской и юг Тюменской областей пролегал меридионально-ориентированный полярный фронт с волнами.

В ночь на 18 июня на волне полярного холодного фронта над Северным Казахстаном возник южный циклон, который начал смещаться по потоку на север. В теплом секторе циклона распространялась тропическая воздушная масса из Средней Азии, с температурой на изобарической поверхности 850 *гПа* +20...+22°С. При этом градиент температуры на АТ850 в районе полярного фронта достигал 12—14°C/500 *км*. Смещаясь на север, затем на северо-запад вдоль ВФЗ, циклон начал интенсивно углубляться. В 12 *ч* ВСВ его центр находился над востоком Курганской области, давление в центре составляло 993 *гПа*. Уже к 6 *ч* ВСВ 19 июня циклон достиг стадии максимального развития, давление в его центре, расположенном над Тюменской областью, упало до 982 *гПа*, а днем 19 июня он начал заполняться.

По данным глобальных моделей прогноза погоды GFS/NCEP и GEM/CMC, во второй половине дня 18 июня в теплом секторе циклона вблизи точки окклюзии над восточными районами Курганской области прогнозировалось сочетание чрезвычайно сильной конвективной неустойчивости (САРЕ составила более 3000 Дж/кг), сильного вертикального сдвига ветра и вертикальной завихренности. Высокое значение индекса смерчеопасности ЕНІ также указывало на значительную вероятность возникновения смерчей (табл. 4.3).

По данным геостационарного спутника Meteosat, около 9 ч ВСВ над территорией Северного Казахстана вблизи границы с Курганской областью возникли скопления кучево-дождевых облаков, которые вдоль потока смещались на север. Конвекция имела «взрывной» характер, температура ВГО уже к 09 ч 45 мин ВСВ достигла –60°С. В 10 ч 45 мин ВСВ центральная часть сформировавшейся общирной МКС сместилась на Лебяжьевский район Курганской области, где были зафиксированы шквалы и смерч. В 11 ч 45 мин ВСВ по данным

Меteosat, над западной частью Мокроусовского района наблюдался пробой тропопаузы с температурой верхней границы облаков  $-65^{\circ}$ С, который вероятнее всего был связан с мезоциклоном (рис. 4.2). Именно в это время наблюдался ся смерч на западе Мокроусовского района в дер. Малое Песьяново. К 12 ч 30 *мин* ВСВ общирная МКС, диаметр которой превышал 400 *км*, сместилась на территорию Тюменской области. При этом температура верхней границы облаков в районе Тюмени и Заводоуковска достигала  $-65^{\circ}$ С, что также указывало на высокую вероятность развития ОЯ.



Рис. 4.2. Температура ВГО над Курганской областью по данным геостационарного спутника Meteosat-8 на 13.45 ВСВ 18.06.2017 г. Черной окружностью выделен пробой тропопаузы над Мокроусовским районом с температурой ВГО до –65°С

# 4.2.3. Анализ результатов прогноза мезомасштабных конвективных систем со смерчами

Для моделирования МКС со смерчами была использована модель WRF с динамическими ядрами ARW и NMM, как с использованием вложенных расчетных областей, так и без них. Характеристики настроек модели WRF с использованием вложенных сеток приведены в табл. 3.7. Стоит отметить, что для случаев МКС со смерчами 2017 г. в качестве начальных и граничных условий был использован прогноз модели GFS с предварительным усвоением данных объективного анализа, а для случаев 7 июня 2009 г. и 29 августа 2014 г. был использован реанализ CFS. Кроме того, случаи возникновения МКС со смерчами 2017 г. были спрогнозированы без использования вложенных расчетных областей на горизонтальном разрешении 3 и 7,2 *км*. Расчеты проводились на MBK «ПГНИУ-Кеплер».

Для случая формирования МКС со смерчами 7 июня 2009 г. применение вложенных расчетных областей не повлекло за собой заметного улучшения качества прогноза. Для случая 29 августа 2014 г. удалось воспроизвести на вложенной сетке с шагом 1 км (динамическое ядро ARW) компактную МКС с признаками мезоциклона (SRH достигала 1000  $m^2/c^2$ , а отражаемость составила 55  $dB_z$ ). Однако ее интенсивность оказалась заниженной, а время ее возникновения по модели отстает от фактического более, чем на 2 ч. Тем не менее, без использования вложенных расчетных областей МКС не воспроизводилась вообще.

Использование динамического ядра NMM для обоих случаев не принесло улучшения качества прогноза. Для случая 29 августа 2014 г. МКС со смерчем не воспроизвелась.

Таким образом, использование вложенных расчетных областей для двух случаев моделирования МКС со смерчами не устраняет проблемы качества ис-

ходных данных, использованных в качестве начальных и граничных условий (реанализа CFS).

Для прогноза МКС со смерчами 3.06.2017 и 18.06.2017 применение вложенных расчетных областей не повлекло за собой улучшения качества прогноза МКС. Наиболее точный прогноз в обоих случаях на расчетной области 3 *км* с использованием динамического ядра ARW (табл. 4.4). Для случая 18.06.2017 удалось воспроизвести МКС и связанные с ней явления без расхождения по времени и по пространству (рис. 4.4). Для случая 3.06.2018 удалось воспроизвести МКС с признаками мезоциклона без ошибки по местоположению с отставанием по времени на 1,5 *ч*. (рис. 4.3, табл. 4.4).



Рис. 4.3. Прогноз МКС со смерчем 03.06.2017 и сопоставление со снимком Meteosat-8: *а)* снимок Meteosat-8 в синтезе каналов HRW-HRW-IR в 11 ч 15 мин ВСВ,
б) температура ВГО по снимку Meteosat-8 в 11 ч 15 мин ВСВ, в) температура ВГО по модели WRF в 11 ч ВСВ, с) максимальная отражаемость по модели WRF в 11 ч ВСВ



Рис. 4.4. Прогноз МКС со смерчем 18.06.2017 и сопоставление со снимком Meteosat-8: *a)* снимок Meteosat-8 в синтезе каналов HRW-HRW-IR в 11 *ч* 30 *мин* ВСВ, *б)* температура ВГО по снимку Meteosat-8 в 11 *ч* 30 *мин* ВСВ, *в)* температура ВГО по модели WRF в 12 *ч* ВСВ, *с)* максимальная отражаемость по модели WRF в 12 *ч* ВСВ

Качество прогноза МКС моделью WRF с динамическим ядром NMM оказалось низким. Кроме того, эксплуатация данного динамического ядра выявила его несовместимость с оборудованием суперкомпьютера «ПГНИУ-Кеплер» (зафиксированы частые программные сбои и отказы динамического ядра NMM). Таким образом, его дальнейшая эксплуатация на MBK «ПГНИУ-Кеплер» нецелессобразна.

## Сопоставление прогноза МКС с применением модели WRF-ARW/NMM

Дата,	Динамическое	Горизонтальный	Температура верхней Расстояние		Ошибка
время	ядро	шаг сетки	границы	между фактиче-	по вре-
(BCB)		модели, км	облачности, °С ским и модель-		мени, ч
			(данные ным положением		
			Meteosat/данные	МКС, км	
			модели WRF)		
03.06.2017,	ARW	7,2	-62/-61	40	+1,25
11.00 -		3	-62/-61	10	0
12.00		3	-62/-62	0	-0,5
		(вложенная)			
	NMM	5,1	-62/-63	50	+3,0
		2,1	-62/-62	50	+2,5
18.06.2017,	ARW	7,2	-64/-62	35	+1,5
11.00 -		3	-64/-64	10	+1,5
12.00		3	-64/-62	15	+2,5
		(вложенная)			
	NMM	5,1	-64/-64	15	+2,0
		2,1	-64/-65	20	+2,0
		1,7	-64/-62	15	+2,0
		(вложенная)			

#### с данными спутника Meteosat-8

# 4.3. Численное моделирование случаев вспышек смерчей на Урале и Европейской территории России

Всвязи с тем, что сильные смерчи на территории Урала наблюдаются крайне редко, целесообразно включить Европейскую территорию России для увеличения выборки случаев. Для анализа были выбраны 8 случаев смерчей и tornado outbreaks, наблюдавшихся на территории России с 2007 по 2016 гг. (табл. 4.5). Основными источниками данных об исследуемых случаях смерчей была Европейская база данных опасных явлений погоды (ESWD) [77] и данные о ветровальных нарушениях лесного покрова, вызванных прохождением смерчей. В базе данных ESWD приведены подробные сведения о смерчах 03.06.2009 г. в Краснозаводске (Московская область), 29.08.2014 г. в Янауле и 13.07.2016 в Пуршево (Московская область). Интенсивность перечисленных смерчей оценивается как EF3 по шкале Фуджиты-Пирсона [82]. Остальные случаи смерчей

были выявлены на основе анализа ветровальных нарушений лесного покрова. Для идентификации ветровалов использовались данные Global Forest Change Map [89], полученные по многолетнему ряду спутниковых снимков LANDSAT с детальностью 30 м, а также космические снимки сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов.

Основными критериями выделения смерчевых ветровалов были геометрические особенности и характер повала деревьев. Протяженность смерчевого ветровала обычно превышает его ширину в 10 и более раз, а деревья повалены с отклонением влево от направления движения смерча на 70—90°, что указывает на наличие циклонического вращения. Таким образом, на основе анализа данных космической съемки были восстановлены данные о треках смерчей и их основные характеристики (табл. 4.5). Более подробное описание методики выявления смерчевых ветровалов представлено в работе [109].

Таблица 4.5

№	Дата	Координааты (Начало)	Координаты (конец)	Количество смерчей	Ширина и длина пути наиболее сильного смерча (км)	Площадь лесных ветровалов, Га	Интенсивность (по ESWD)
1	23 Jun 2007	61,22 N 60,47 E	64,14 N 58,47 E	6	11,9/0,8	660	_
2	26 Jun 2008	60,94 N 46,25 E	61,11 N 46,12 E	2	22,1/2,0	1457	-
3	03 Jun 2009	56,42 38,24	56,88 38,73	2	27/0,7	302	EF3
4	07 Jun 2009	59,39 N 53,31 E	61,61 N 55,49 E	9	50/0,9	2404	_
5	12 Jun 2010	57,93 N 39,05 E	56,92 N 44,83 E	3	21/0,7	490	EF2
6	07 Aug 2012	59,56 N 34,69 E	60,17 N 35,41 E	2	80/1,0	1583	_
7	29 Aug 2014	55.98 N, 54.36 E	56.26 N, 54.95 E	1	47/0,6	143	EF3
8	13 Jul 2016	55.58 N, 35.89 E	55.67 N, 36.56 E	1	44/0,57	414	EF3

Характеристики серии смерчей

Для получения более полной информации о случаях смерчей и сопровождавших их опасных явлений погоды были использованы опубликованные в открытом доступе данные сети метеостанций, наблюдения очевидцев смерчей, отчеты о нанесенном ущербе, сведения из средств массовой информации, фотографии и видеозаписи смерчей и их последствий.

Для анализа синоптических условий возникновения смерчей использованы данные реанализа CFSR [104] с пространственным разрешением 0,5° и временным разрешением 6 ч, а также синоптические карты, полученные из архивов Росгидромета. Данные температурно-ветрового зондирования атмосферы не использовались, поскольку в большинстве случаев они не являются репрезентативными для анализа условий возникновения смерча, что обусловлено редкостью сети аэрологических наблюдений, значительной удаленностью станций от мест возникновения смерчей, а также нерегулярностью получения данных с некоторых станций.

В качестве основного инструмента исследований была использована мезомасштабная негидростатическая модель атмосферы WRF-ARW версии 3.8.1 [106]. Модель запускалась в режиме прямого моделирования конвекции с шагом сетки 9 и 3 км. При таком пространственном разрешении явное моделирование смерча невозможно. Однако модель позволяет воспроизвести возникновение и развитие мезомасштабной конвективной системы, с которой был связан смерч, в том числе развитие мезоциклона [71, 94]. Кроме того, по модели был рассчитан ряд термодинамических и кинематических параметров, характеризующих условия, благоприятные для возникновения смерча, такие, как потенциальная доступная энергия неустойчивости (САРЕ), относительная завихренность (SRH) и energy helicity index (EHI) [108].

Расчеты с шагом 9 км были выполнены для всех случаев смерчей, а с шагом 3 км – только тогда, когда модель успешно воспроизводила глубокую конвекцию при расчете с низким разрешением. В качестве начальных и граничных условий для модели WRF использовались данные реанализа NCEP CFSR (Coupled Forecast System reanalyses) и GFSR (Global forecast system reanalyses) с ша-

гом сетки 0,5°, а также (для случая смерча 13.07.2016 г.) и прогноз NCEP/GFS (с шагом сетки 0,5°). Другие настройки модели описаны в табл. 3.2.

Оценка качества результатов моделирования была выполнена на основе следующих критериев:

— сопоставлением времени возникновения и пути перемещения мезоциклона по модели WRF с фактическим треком смерча (выявленным на основе анализа ветровальных нарушений лесного покрова);

— сопоставлением пространственного положения и времени прохождения зон активной конвекции по модели WRF и по спутниковым данным Terra/Aqua MODIS;

— сопоставлением фактической скорости порывов ветра по модели и по данным метеостанций.

## 4.3.1. Синоптические условия формирования смерчей

Синоптические условия образования смерчей на территории России рассмотрены в работах [47, 57, 68, 75, 81]. Смерчи, как правило, возникают вблизи центров циклонов или активных волновых возмущений. В 70% случаев они формируются в теплых секторах циклонов в 50—100 км перед холодным фронтом, а в 20% случаев — вблизи точки окклюзии [47]. Снитковский А.И. на основе анализа 248 случаев смерчей на территории бывшего СССР выделил 4 типа атмосферных процессов, при которых образуются смерчи. Для всех 4-х типов отличительными особенностями являются быстрое окклюдирование полярной фронтальной системы и заток в теплый сектор циклона воздушной массы морского происхождения. Наиболее сильные смерчи наблюдаются, как правило, в теплых секторах углубляющихся южных циклонов, перемещающихся с юга или юго-запада на север или северо-восток.



Рис. 4.5. Синоптические условия образования смерчей по данным реанализа CFS.

Анализ синоптических условий образования восьми рассматриваемых случаев смерчей в целом подтверждает выводы А.И. Снитковского. Все смерчи сформировались в передней части высотных ложбин на фоне высокой (от 20 до 33 M/c) скорости ветра в средней тропосфере. Максимальная скорость ветра (33 M/c) на изобарической поверхности 500  $c\Pi a$  наблюдалась 29.08.2014 г. при развитии смерча в Северном Предуралье, интенсивность которого достигала EF3 по шкале Фуджита. Во всех рассматриваемых случаях также наблюдался выраженный вертикальный сдвиг ветра.

Шесть из восьми рассматриваемых смерчей сформировались в центральной части достаточно глубоких южных, юго-западных или западных циклонов (рис. 4.5). Два случая (07.06.2009 и 13.07.2016 г.) были связаны с прохождением активных волновых возмущений на фронтах полярной системы (рис. 4.5, *г*, *з*). Температура воздушной массы (на изобарической поверхности 850 *гПа*) в теплых секторах циклонов и волновых возмущений составляла 15—20°С. В большинстве случаев в теплых секторах циклонов наблюдалась адвекция тропического воздуха из районов Черного и Каспийского морей. В остальных случаях воздушные массы в теплом секторе имели средиземноморское происхождение и распространялись с западными потоками из Центральной Европы.

Интенсивные восходящие движения в центральных частях циклонов обусловили высокое влагосодержание воздушных масс (30–40 кг/м<sup>2</sup>). В двух случаях (23.06.2007 и 26.06.2008 г.) увеличению влагосодержания способствовало перемещение воздушной массы над хорошо увлажненной, залесенной и заболоченной подстилающей поверхностью.

В большинстве случаев образование смерчей наблюдалось в пределах хорошо выраженных фронтальных зон со значительными градиентами температуры воздуха. Максимальный градиент температуры на изобарической поверхности 850 гПа (до 12—14°C/500 км) наблюдался при образовании смерчей на Урале 23.06.2007 и 07.06.2009 (рис. 4.5, *a*, *г*). На Европейской территории России смерчи наблюдались при меньших контрастах температуры

(5—10°С/500 км на изобарической поверхности 850 гПа), а один из рассматриваемых случаев (12.06.2010 г.) вообще не был связан с контрастной фронтальной зоной (рис, 4.5, *д*).

Детальные описания серий смерчей 7 июня 2009 г. и 29 августа 2014 г. приведены в п. 4.1.1.

Серия смерчей 23 июня 2007 г. в Северном Зауралье наблюдалась в период между 14 и 19 ч ВСВ в теплом секторе глубокого циклона (с давлением в центре 982 гПа), сместившегося с Каспийского моря в Зауралье. Данный случай по классификации А.И. Снитковского может быть отнесен к первому типу синоптических условий, благоприятных для образования смерчей. В теплый сектор циклона поступала воздушная масса с температурой на изобарической поверхности 850 гПа до +22°С и высоким влагосодержанием (более 40 кг/м<sup>2</sup>). На холодном фронте полярной системы и вблизи центра циклона во второй половине дня и вечером 23 июня сформировалось несколько обширных и долгоживущих скоплений кучево-дождевых облаков с температурой верхней границы до -60°С и ниже, которые перемещались вдоль фронта с юго-востока на северозапад. Смерчи прошли через малонаселенную покрытую лесом территорию, и не были зафиксированы ни очевидцами, ни наблюдательной сетью метеостанций. Однако на основе анализа ветровальных нарушений лесного покрова было выявлено не менее 6 смерчевых ветровалов с максимальной шириной трека до 900 м, а также несколько ветровалов, вызванных шквалами. Протяженность зоны, в которой наблюдались смерчи и сильные шквалы, составила более 400 км.

Серия смерчей 26.06.2008 в Архангельской области наблюдалась в период между 10 и 15 ч ВСВ в теплом секторе неглубокого (с давлением в центре 1004 гПа) южного циклона. Циклон перемещался со Среднего Поволжья на северозапад. Таким образом, данный случай можно отнести по классификации А.И. Снитковского ко второму типу. Зона активной конвекции сформировалась вблизи центра циклона в его теплом секторе. Линия неустойчивости была ориентирована с юга на север и имела протяженность около 300 км. Вдоль нее в

период между 10 и 15 v BCB возникли не менее трех суперячейковых кучеводождевых облаков (Supercell convective storms), которые смещались по потоку с юго-востока на северо-запад. Два смерча прошли через малонаселенную местность и были выявлены на основе анализа ветровальных нарушений лесного покрова. Ширина ветровала от второго смерча, возникшего севернее г. Котлас, достигала 2000 *м*. Помимо смерчей, было зафиксировано не менее трех локальных сильных шквалов, также связанных с прохождением мезоциклонов, которые вызвали сплошные ветровалы на площади 350 *га*. Также шквал прошел через г. Котлас, где вызвал значительные разрушения [77].

Серия смерчей 3.06.2009 г. в Московской и Ярославской областях наблюдалась с 18 ч 30 мин до 20 ч ВСВ в передней части глубокой высотной ложбины в теплом секторе интенсивно углубляющегося юго-западного циклона, который смещался с территории Украины. Таким образом, данный случай относится к первому типу по классификации А.И. Снитковского. Смерчи возникли вблизи точки окклюзии полярного фронта. Мезоциклон сформировался в районе г. Сергиев Посад на юго-восточной периферии обширного скопления кучеводождевых облаков с температурой верхней границы до -60°С (по данным Aqua MODIS). Первый смерч прошел около 18 ч 30 мин ВСВ через территорию г. Краснозаводск и вызвал значительные разрушения. Интенсивность данного смерча достигала F3, но длина его пути составила всего 2,1 км. В результате прохождения смерча через г. Краснозаводск погиб один человек и 60 человек получили травмы [77]. В 30 км северо-восточнее Краснозаводска возник второй смерч, который прошел путь длиной 31 км. Ширина полосы ветровалов от второго смерча достигала 600 м, а площадь ветровала превысила 300 га. Также от смерча была частично разрушена деревня Купавна. Помимо смерчей в Московской и Ярославской областях наблюдались шквалы со скоростью ветра до 25 *м/с* и крупный град.

Серия смерчей 12.06.2010 г. в Нижегородской и Ярославской областях наблюдалась с 11 до 15 ч ВСВ в теплом секторе частного углубляющегося цик-

лона с давлением в центре 990 гПа. Циклон сформировался у точки окклюзии полярной системы и со скоростью более 70 *км/ч* перемещался по потоку с запада на восток. Таким образом, данный случай может быть отнесен по классификации А.И. Снитковского к третьему типу, поскольку он наблюдался в условиях интенсивного зонального переноса воздушных масс.

На полярном холодном фронте вблизи точки окклюзии, располагавшейся над Ярославской областью, по снимку Aqua MODIS в 10 u 45 *мин* BCB наблюдалось обширное скопление кучево-дождевых облаков с температурой верхней границы до  $-64^{\circ}$ C. В этом районе был выявлен первый смерчевый ветровал, протяженность которого составила 19 *км*. Смещаясь с высокой скоростью на восток-юго-восток, данная мезомасштабная конвективная система вызвала разрушительный шквал в районе г. Судиславль и смерч на севере Нижегородской области. Протяженность сплошного ветровала, вызванного шквалом, достигла 50 *км*, а ширина составила от 2 до 4 *км*. Смерч в Семеновском районе Нижегородской области наблюдался около 14 u BCB и имел интенсивность EF2 по шкале Фуджиты-Пирсона [79]. Он прошел путь длиной 17 *км* и шириной 400 *м* и частично разрушил д. Озеро. На большей части территории Нижегородской области также наблюдались шквалы со скоростью ветра до 30 *м/c*, которые нанесли значительный ущерб.

Вспышка смерчей в Ленинградской области 7.08.2012 г. также наблюдалась в условиях интенсивного зонального переноса воздушных масс, в связи с чем по классификации А.И. Снитковского может быть отнесен ко второму типу. Смерч образовался вблизи точки окклюзии интенсивно углубляющегося циклона, который перемещался с высокой скоростью с юго-запада на северовосток. Давление в центре циклона составляло 996 гПа. Теплая и влажная воздушная масса поступала в теплый сектор циклона с юго-западными потоками из Центральной Европы.

Зона интенсивной конвекции сформировалась на холодном фронте и вблизи точки окклюзии полярной системы над Новгородской областью, где около

15 ч ВСВ отмечались грозы и шквалы со скоростью ветра до 20 м/с. В Бокситогорском районе Ленинградской области около 17 ч ВСВ возникло два смерча. Смерчи перемещались параллельно друг другу с юго-юго-запада на северсеверо-восток на расстоянии около 40 км друг от друга, прошли через малонаселенную покрытую лесом и болотами местность и не были зафиксированы очевидцами. Треки смерчей были идентифицированы по ветровальным нарушениям лесного покрова. Длина пути смерча, который смещался восточнее, составила 80 км, а ширина — от 500 до 1000 м. Одновременно со смерчами наблюдались шквалы, вызвавшие значительный ущерб в г. Бокситогорск.

Смерч в Московской области 13.07.2016 г. попал в зону наблюдения нескольких доплеровских радиолокаторов, что позволило детально изучить условия его возникновения. МКС, в которой сформировался смерч, возникла в передней части активного волнового возмущения на стационарном широтноориентированном полярном фронте. Время существования МКС составило более 10 ч, за которое она прошла путь протяженностью свыше 1000 км. В 12 ч 30 мин ВСВ в южной части МКС над территорией Беларуси возник мезоциклон, с прохождением которого наблюдался разрушительный шквал на юговостоке от г. Минск [79]. К 18 ч ВСВ МКС переместилась на запад Московской области, где на ее южной периферии вновь образовался мезоциклон. Через Можайский и Рузский районы Московской области прошел смерч, длина пути которого составила 47 км, а ширина изменялась от 100 до 570 м. Интенсивность смерча достигла EF3 по шкале Фуджиты-Пирсона [79]. Смерч вызвал значительные разрушения в населенных пунктах Пуршево, Прудня, Старая Руза и Колюбакино. Погиб 1 человек и 17 человек получили травмы. Более 10 домов были полностью разрушены. К 20 ч 30 мин ВСВ мезоциклон сместился на северо-восточный район Москвы, где также был зафиксирован разрушительный шквал, вызвавший ветровал в лесном массиве.

# 4.3.2. Численное моделирование мезомасштабных конвективных систем со смерчами

В большинстве рассматриваемых случаев, модель WRF воспроизводит основные вышеописанные циркуляционные особенности, способствовавшие развитию смерчей. Это обеспечивает качественные результаты моделирования возникновения и эволюции мезомасштабных конвективных систем. Однако в некоторых случаях в данных реанализа CFSR и GFSR, использованных в качестве начальных условий для запуска модели WRF, содержатся существенные ошибки при определении пространственного положения фронтальных зон. Это негативно сказывается на качестве результатов мезомасштабного моделирования. Например, в случае 7.06.2009 г. меридионально ориентированный полярный холодный фронт (вдоль которого развивалась конвекция) по модели WRF оказался смещен на 100 км к востоку относительно своего фактического положения. В результате модель WRF не воспроизвела глубокую конвекцию в зоне, где фактически прошли смерчи. В то же время модель успешно воспроизводит шквалы, наблюдавшиеся в более восточных районах.

Важнейшими условиями, способствующими развитию суперячейковых конвективных штормов и смерчей, являются высокие значения конвективной неустойчивости, вертикального сдвига ветра и относительной завихренности [72, 81]. Для оценки термодинамической неустойчивости воздушной массы были использованы рассчитанные по модели WRF индексы неустойчивости Surface-based CAPE, 0—30hPa Mixed-Layer Lifted Index (ML LI) а также энергия противодействия конвекции Surface-based CIN. Последний параметр характеризует наличие задерживающих слоев в профиле и успешно используется для разделения случаев возникновения суперячейковых штормов с торнадо и без них (tornadic and non-tornadic supercells) на территории США [68]. Максимальные значения рассчитанных параметров неустойчивости в радиусе 50 км от места развития смерчей приведены в табл. 4.5.

В большинстве рассматриваемых случаев, модель воспроизводит умеренную или сильную конвективную неустойчивость в районе формирования смерча. Характерные значения САРЕ находятся в пределах 1500—2500 Дж/кг, ML LI от -4,5 до -9. Единственным исключением является случай 7.06.2009 г., когда вследствие смещения зоны активной конвекции по модели к востоку относительно ее фактического положения, модель воспроизвела лишь слабую неустойчивость (САРЕ < 1000 Дж/кг). Максимальная конвективная неустойчивость из рассматриваемых случаев наблюдалась 23.06.2007 г. Значения САРЕ в районе формирования смерчей вблизи центра циклона достигали 2500 Дж/кг, а ML LI — -9. Восточнее, в теплом секторе циклона, САРЕ превышала 4000 Дж/кг.

Таблица 4.5

#### Максимальные значения индексов неустойчивости,

	Численные значения индексов неустойчивости атмосферы*					
Пата	Surface-based	0–30 hPa	Surface-	0–3 km storm	Energy helici-	Максимальная
	САРЕ, Дж/кг	Mixed-Layer	based CIN,	relative helici-	ty index	скорость вос-
Дата		Lifted Index,	Дж/кг	ty (SRH), $m^2 \cdot s^-$	(EHI)	ходящих то-
		Κ		2		ков на АТ925
						гПа, м/с
23.06.2007*	2500	-9	-10	850	3,5	5
26.06.2008	2500/2100	-6,5/-6	-40	1100/1100	5,2/5,1	12/14
10.00 - 15.00						
3.06.2009	1500/1650	-4,4/-5,1	-10/-20	350/550	1,7/2,5	3,6/6,3
16.00 - 20.00						
7.06.2009	600/1100	-2,5/-3,5	-5/-40	200/250	0,6/1	8/4
16.00 - 20.00						
12.06.2010	2500/2600	-6/-8,5	-10/-10	200/200	2,7/2,4	8,5/8
11.00 - 16.00						
7.08.2012	1600	-6,5	-40	1260	5,7	7,8
16.00 - 19.00						
29.08.2014	-/1500	/5,5	_/_70	-/450	-/1,7	-/2,1
13.00 - 17.00						
13.07.2016	1600/2000	-6/-7	-80/-70	450/1270	3/6,1	3/14
16.00 - 22.00						

полученные в результате WRF-моделирования

\* — в числителе — с использованием в качестве начальных и граничных условий реа-

нализа CFS, в знаменателе — GFS.

Задерживающие слои в профиле модель воспроизводит в половине рассматриваемых случаев. Наиболее высокие значения индекса СІN по модели зафиксированы 13.07.2016, когда смерч наблюдался на теплом участке фронта. Также высокие значения индекса СІN модель воспроизводит 29.08.2014 г. вблизи точки окклюзии полярной системы в условиях значительной облачности и слабого дневного прогрева приземного слоя воздуха.

Величина storm relative helicity (SRH) характеризует интенсивность вращения восходящего потока и имеет большое значение для формирования мезоциклонов и торнадо. Относительная завихренность, проинтегрированная в слое от земной поверхности до уровня 3 *км* используется для прогноза суперячейковых штормов, а в слое 0—1 *км* — для прогноза торнадо [85]. Помимо SRH, был рассчитан комплексный параметр прогноза смерчеопасности на основе оценки конвективной неустойчивости и завихренности — Energy Helicity Index (EHI).

В трех случаях (26.06.2008, 7.08.2012 и 13.07.2016) модель WRF воспроизвела локальные области с очень высокими значениями SRH (> 1000  $M^2 \cdot c^{-2}$ ) в зонах активной конвекции. Эти области соответствуют мезоциклонам. Они хорошо выражены также в поле атмосферного давления (рис. 4.6). Модель также воспроизводит усиление ветра в мезоциклонах с максимальными порывами от 17 (26.06.2008 и 13.07.2016) до 25 M/c (7.08.2012). Все смоделированные мезоциклоны существовали в течение 4—5 u, перемещаясь с некоторым отклонением вправо от направления ветра в средней тропосфере. Диаметр мезоциклонов по модели составляет 30—50  $\kappa M$ , а глубина в поле приземного давления — от 4 до 10  $c\Pi a$ .

Успешность моделирования мезоциклонов с шагом сетки 9 км определяется использованными при запуске модели WRF начальными условиями. Мезоциклон, сформировавшийся в зоне активной конвекции 26.06.2008 г., воспроизводится по модели при использовании в качестве начальных условий реанализов GFSR и CFSR. В обоих случаях он имеет примерно одинаковую интенсивность и продолжительность существования (4—5 u). Однако при запуске моде-

ли на начальных данных реанализа GFSR мезоциклон формируется на 1 ч позже, чем при расчете на основе данных CFSR. В обоих случаях, траектория центра мезоциклона проходит на 40 *км* западнее фактического пути смерча.



Рис. 4.6. Развитие МКС со смерчами 26 июня 2008 г. по данным модели WRF с горизонтальным разрешением 7,2 км: относительная завихренность (*a-в*) и максимальная отражаемость (*c-e*) в 12, 13 и 14 ч ВСВ

Мезоциклон 07.08.2012 г. успешно воспроизводится по модели WRF при использовании в качестве начальных условий данных реанализа CFSR. Его траектория соответствует фактическому пути прохождения второго (менее интен-



сивного) смерча. Второй мезоциклон, перемещавшийся в 40 км восточнее и с которым был связан более сильный смерч, модель не воспроизвела (рис. 4.7).

Рис. 4.7. Развитие МКС со смерчами 7 августа 2012 г. по данным модели WRF с горизонтальным разрешением 7,2 км: относительная завихренность (*a-в*) и максимальная отражаемость (*c-е*) в 16, 17 и 18 ч ВСВ

Мезоциклон 13.07.2016 г. воспроизводится моделью WRF при ее запуске на основе данных peahaлиза GFSR или прогноза GFS с шагом сетки 0,5°. При использовании данных CFSR мезоциклон не воспроизводится. Наиболее точно

траектория мезоциклона смоделирована при запуске модели WRF на начальных данных прогноза GFS с шагом 0,5° (рис. 4.8). Она полностью совпадает с фактической траекторией смерча, прошедшего через Можайский и Рузский районы Московской области. Сместившись на восток, этот же мезоциклон вызвал сильные шквалы в северо-восточной части Москвы, что также воспроизводится моделью.



Рис. 4.8. Развитие МКС со смерчами 13 июля 2016 г. по данным модели WRF с горизонтальным разрешением 7,2 *км*: относительная завихренность *(а-в)* и максимальная отражаемость *(г-е)* в 18, 19 и 20 ч ВСВ

В остальных рассматриваемых случаях модель не воспроизвела формирование мезоциклонов, поэтому максимальные значения SRH оказались существенно ниже (в пределах  $300-850 \ m^2 \cdot c^{-2}$ ).

Максимальные значения индекса ЕНІ по модели WRF (в пределах от 5 до 6) также зафиксированы в тех случаях, когда было успешно смоделировано развитие суперячеек (26.06.2008, 7.08.2012 и 13.07.2016 г.). Такие высокие значения ЕНІ указывают на очень высокую вероятность формирования сильных смерчей. В остальных случаях значения ЕНІ были существенно ниже (табл. 4.5). Максимальная скорость восходящих потоков на изобарической поверхности 925  $c\Pi a$  (12—14 m/c) также получена в тех случаях, когда модель воспроизвела формирование мезоциклонов.

При запуске модели WRF с высоким пространственным разрешением (3 км) на тех же начальных условиях не удалось воспроизвести ни один из трех перечисленных случаев возникновения суперячейковых штормов. При этом модель более детально воспроизводит усиление ветра в зонах интенсивных конвективных осадков.

Расчет композитной радиолокационной отражаемости (composite radar reflectivity, dBz) и температуры верхней границы облаков (cloud top temperature) по модели WRF часто используется для верификации численного прогноза пространственного положения и интенсивности МКС и отдельных конвективных штормов [94, 103]. При этом в качестве проверочных данных применяются радиолокационные и спутниковые наблюдения, что позволяет использовать объектно-ориентированный подход, имеющий явные преимущества в сравнении с традиционными методами оценки прогноза локальных конвективных явлений на основе данных точечных наблюдений [14, 72].

В настоящей работе по причине отсутствия данных доплеровских радиолокаторов верификация прогноза выполнялась на основе измерений радиояркостной температуры верхней границы облаков (cloud top temperature, CTT) со спутников Terra/Aqua MODIS. Во всех рассматриваемых случаях (кроме

29.08.2014 г.) по данным MODIS были зафиксированы мезомасштабные конвективные системы с экстремально низкой СТТ (ниже –60°С) и наличием пробоя тропопаузы (overshooting tops) [65], что указывает на интенсивные восходящие движения и высокую вероятность развития опасных явлений погоды, включая смерчи. Примеры сопоставления положения мезомасштабных конвективных систем, в которых наблюдались смерчи, по спутниковым данным и по модели приведены на рис. 4.9, а общая оценка прогноза представлена в табл. 4. Эта оценка выполнена для всех случаев, кроме 29.08.2014, когда МКС не была зафиксирована по спутниковым данным.



Рис. 4.9. МКС со смерчами 7 августа 2012 г. (вверху) и 13 июля 2016 г. (внизу) по данным модели WRF с горизонтальным разрешением 9 км (в центре) и по данным Terra/Aqua MODIS (справа, слева).

В трех случаях (26.06.2008, 07.08.2012 и 13.07.2016) модель успешно воспроизвела траекторию перемещения мезомасштабных конвективных систем, вызвавших смерчи, зоны активной конвекции с пробоем тропопаузы, а также развитие мезоциклонов (рис. 4.5—4.9). При этом расчетные значения СТТ близки к данным спутниковых измерений. Траектория перемещения МКС по фактическим данным и по модели различается не более чем на 100 *км*, а время прохождения МКС через район формирования смерча отличается от фактического не более чем на 1 *ч*.

Наименее успешными являются прогнозы МКС со смерчами 07.06.2009 и 29.08.2014 г. В этих случаях модель WRF не воспроизводит развитие глубокой конвекции в районах, где прошли смерчи.

В остальных случаях модель воспроизводит активную конвекцию в зонах формирования смерчей, но имеются значительные ошибки в прогнозе места и времени возникновения опасных явлений погоды. Так, в случае 12.06.2010 модель воспроизводит формирование мезомасштабной конвективной системы с СТТ ниже  $-61^{\circ}$ С и высокими характеристиками радиолокационной отражаемости (до 59 *dBz*) в 200 *км* к северу от ее фактической траектории, и на 1 *ч* позже фактического времени ее прохождения. В случае 23.06.2007 г. модель успешно воспроизводит глубокую конвекцию. При этом траектория прохождения МКС по фактическим данным и по модели в основном совпадает, однако время прохождения МКС через район, где формировались смерчи, по модели и по спутниковым данным различается на 2 *ч*.

Значительное влияние на успешность прогноза оказывает выбор начальных данных глобальной модели (реанализа GFSR или CFSR). Наиболее существенные ошибки прогноза могут быть вызваны именно начальными условиями. В трех случаях (3.06.2009, 12.06.2010 и 13.07.2016) использование реанализа GFSR обеспечивает получение более высокого качества результатов моделирования, чем по данным реанализа CFSR. В двух случаях (26.06.2008 и 07.06.2009) МКС более успешно воспроизводится при использовании началь-

ных данных реанализа CFSR. Таким образом, сделать однозначный вывод о том, какие начальные данные для модели WRF являются оптимальными при прогнозе MKC со смерчами, на данный момент не представляется возможным.

## 4.4. Выводы по главе 4

1. Качество воспроизведения МКС со смерчами мезомасштабной моделью WRF в значительной степени зависит от начальных и граничных условий (данных глобальных прогностических моделей). Таким образом, качество воспроизведения может повышаться по мере совершенствования глобальных моделей. Сделать однозначный вывод о том, какие начальные и граничные условия обеспечивают наилучшее качество воспроизведения МКС, на данный момент не представляется возможным. Для получения сверхкраткосрочного прогноза перспективы повышения надежности связаны с использованием данных глобальной модели ECMWF.

2. Модель WRF-ARW с горизонтальным разрешением 3 км без использована для вложенных расчетных областей может быть успешно использована для прогноза МКС со смерчами, что подтверждается двумя успешными прогнозами для случаев 2017 г. Высокое качество прогноза можно объяснить не только подбором удачной конфигурации модели WRF-ARW, но и совершенствованием модели NCEP-GFS, использованной в качестве начальных и граничных условий. В то же время, использование вложенных расчетных областей для прогноза МКС со смерчами не позволило улучшить качество прогноза.

3. Модель WRF-NMM не обеспечивает качественное воспроизведение МКС со смерчами. Кроме того, в процессе эксплуатации выявлены недостатки программного комплекса WRF-NMM, которые свидетельствуют о нецелесообразности его дальнейшего использования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты.

1. Разработана оперативно пополняемая база данных опасных метеорологических явлений на территории Пермского края с 1990 г. В нее заносятся случаи ОЯ, зафиксированные не только по результатам наблюдений на стандартной сети Росгидромета, но и с помощью спутникового мониторинга растительного покрова и свидетельств очевидцев. База данных является региональным аналогом ресурса, содержащего сведения об опасных явлениях погоды на территории Европы (ESWD), и размещена в открытом доступе в сети Internet. Подобный проект на территории России был реализован впервые.

2. Впервые для территории Пермского края произведена оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем и связанных с ними опасных метеорологических явлений с применением глобальных прогностических моделей атмосферы. Для исследования были привлечены модели NCEP-GFS (США), СМС-GEM (Канада), ПЛАВ (Россия). Прогностические данные сопоставлялись с данными наблюдательной сети и спутниковыми снимками Terra/Aqua (MODIS). Было установлено, что отечественная модель ПЛАВ более точно воспроизводит синоптическое положение, что повышает качество прогноза мезомасштабных конвективных систем на территории Урала по сравнению с аналогами.

3. По выходным данным указанных выше прогностических моделей произведен расчет физико-статистических параметров (индексов) конвективной неустойчивости, предназначенных для прогноза опасных метеорологических явлений конвективного происхождения. Для статистической оценки оправдываемости прогноза использован критерий Пирса-Обухова. Установлено, что наилучшее качество прогноза обеспечивает индекс Томпсона. Кроме того, произведен подбор пороговых значений индексов, что позволило увеличить значе-

ния критерия Пирса-Обухова для некоторых индексов, основанных на методе частицы (LI и CAPE), и привело к существенному сокращению количества пропусков явления, хотя число ложных тревог незначительно увеличилось. Отдельно стоит отметить индекс угрозы опасной погоды, который имеет высокую оправдываемость в случаях влияния на развитие конвекции динамических факторов.

4. Разработана модификация индекса плавучести для наиболее неустойчивого перемешанного слоя (MU PBL LI). С помощью данного индекса увеличилось количество оправдавшихся прогнозов по сравнению с индексом плавучести за счет замены разности температуры частицы и окружающего частицу воздуха на изобарической поверхности 500 *гПа* средним значением, рассчитанным для этой же разности на высотах изотерм 0, -20 и  $-40^{\circ}$ С.

5. Установлено, что прямое моделирование конвективных течений без использования процедур параметризации глубокой конвекции в мезомасштабной прогностической модели WRF с динамическим ядром ARW обеспечивает наилучшее качество прогноза мезомасштабных конвективных систем и связанных с ними опасных метеорологических явлений.

6. Произведена оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем и связанных с ними опасных метеорологических явлений моделью WRF с динамическими ядрами ARW и NMM. Результаты расчета сопоставлялись с данными метеорологических радиолокаторов МРЛ-5 в г. Пермь и ДМРЛ-С в г. Ижевск и значениями температуры верхней границы облачности, полученной с помощью спутников Terra/Aqua (MODIS). Установлено, что качество воспроизведения систем глубокой конвекции зависит от начальных и граничных условий, поэтому успешность прогноза будет повышаться по мере совершенствования глобальных прогностических моделей. В ряде случаев модель WRF успешно воспроизводит формирование МКС с сильными шквалами, крупным градом и сильными ливнями (дождями), поэтому ее применение для сверхкраткосроч-

ного прогноза конвективных опасных явлений погоды представляет практический интерес.

7. Выполнена оценка качества воспроизведения моделью WRF с высоким горизонтальным разрешением мезомасштабных конвективных систем с сильными смерчами. Для оценки качества прогноза использовались данные о смерчевых ветровалах и спутниковые данные о температуре верхней границы облачности, полученной с помощью спутников МЕТЕОSAT и Terra/Aqua (MODIS). Установлено, что качество воспроизведения мезомасштабных конвективных систем зависит от начальных и граничных условий, определяемых выходными данными глобальных прогностических моделей, и будет повышаться по мере их совершенствования, что подтверждается успешными прогнозами MKC со смерчами на независимой выборке случаев 2017 года.

8. Использование вложенных расчетных областей в некоторых случаях позволяет улучшить качество воспроизведения мезомасштабных конвективных систем и связанных с ними опасных метеорологических явлений, таких как сильные ливни (дожди) и сильные шквалы. В то же время, использование вложенных расчетных областей для прогноза мезомасштабных систем глубокой конвекции, генерирующих сильные смерчи, не позволило улучшить качество прогноза.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

 Абдуллаев С. М., Желнин А. А., Ленская О. Ю. Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем // Метеорология и гидрология. 2009. № 5. С. 34–45.

2. Абдуллаев С. М., Желнин А. А., Ленская О. Ю. Структура мезомасштабных конвективных систем в центральной России // Метеорология и гидрология. 2012. № 1. С. 20–32.

3. Алоян А.Е., Арутюнян В.О., Ермаков А.Н. Математическое моделирование конвективной облачности в полярных регионах // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30. № 3. С. 222–226.

4. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О., Загайнов В.А. Динамика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере с учетом гетерогенных процессов // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 657–671.

5. Амбрози П., Вельтищев Н.Ф. Использование данных о мезомасштабных особенностях облачности в анализе погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 150 с.

6. Атлас Пермского края / Под общей редакцией Тартаковского А.М. Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2012. 124 с.

7. База данных опасных явлений погоды Пермского края. [Электронный ресурс]: URL: http://map.psu.ru/search.aspx (дата обращения 20.07.2018).

8. Багров А.Н. Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба // Информ. сб. / Гидрометцентр России. М. 2007. № 35. С. 3–20.

9. Безопасность в ЧС. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. ГОСТ Р 22.0.03-95. М. 1995.

10. Беркович Л.В., Ткачева Ю.В. Успешность прогноза сильных осадков в Краснодарском и Ставропольском краях в летний период 2013 года по модели WRF-ARW // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С.23–33.

Богаткин О.Г. Авиационные прогнозы. 2-е изд., стереотипное. — СПб.:
 БХВ-Петербург. 2010. 288 с.

12. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 361. С. 101–119.

13. Быков А.В. Шихов А.Н. Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением глобальных и мезомасштабных гидродинамических моделей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 15. №2. М. 2018. С. 213–224.

14. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5–18.

15. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // Сб. статей "80 лет Гидрометцентру России". М. 2010. С. 94–135.

 Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 30–44.

17. Вельтищев Н.Ф. Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. Учебное пособие. М.: МГУ. Москва. 2007. 127 с.

18. 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.

19. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат. 1991. 616 с.

20. Глобальное поле облачности / Под редакцией Л.Т. Матвеева. Л.: Гидрометеоиздат. 1986. 279 с.

21. Горбатенко В. П., Кречетова С. Ю., Беликова М. Ю., Нечепуренко О. Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектрорадиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10–19.

22. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Пример сравнения индексов неустойчивости средней тропосферы в прогностической модели с информацией о грозовой активности // Метеорология и гидрология. 2014. № 5. С. 40–53.

23. Дмитриева Т.Г., Бухаров М.В., Песков Б.Е. Анализ условий возникновения сильных шквалов по спутниковой и прогностической информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 244–250.

24. Заводченков А.Ф., Переведенцев Ю.П. Грозы Урала и Поволжья, их прогноз / Изд - во Казан. ун-та. 1989. 127 с.

25. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат,1977. 711 с.

26. Инструкция «Критерии опасных метеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения». РД 52.04.563-2002. М.: Росгидромет. 2002. 22 с.

27. Калинин Н.А., Ветров А.Л, Свиязов Е.М, Попова Е.В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С. 21–30.

28. Калинин Н. А. Динамическая метеорология. Перм. гос. ун-т. Пермь. РГГМУ. СПб. Изд. второе, испр. Перм. кн. изд-во. 2009. 256 с.

29. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь. Пермский государственный национальный исследовательский университет. 2015. 308 с.

30. Калинин Н. А., Смирнова А. А. Исследование радиолокационных характеристик для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучеводождевой облачностью // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 84–95.

31. Калинин Н.А., Толмачева Н.И. Космические методы исследований в метеорологии. Пермь: Изд-во Перм. ун-та. 2005. 348 с.

32. Крохин В.В., Баранов Г.Г., Евдокимова Л.И., Моисеев М.Б., Филь А.Ю. Разработка комплексной технологической линии гидродинамического прогноза тропических циклонов // Труды ФГБУ «ДВНИГМИ». Владивосток: Дальнаука. 2012. Вып. 154. С. 41-77.

33. Лаппо П.О., Шакур В.Н., Прохареня М. Результаты верификации модели WRF-ARW в Гидромете Республики Беларусь // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 67–77.

34. Мартынова Ю.В., Зарипов Р.Б., Крупчатников В.Н., Петров А. П.. Оценка качества прогноза динамики атмосферы в Сибирском регионе мезомасштабной моделью WRF-ARW // Метеорология и гидрология . 2014. № 7. С. 14–23.

35. Марчук Г. И. Численные методы в прогнозе погоды. Л.: Гидрометеоиздат. 1967. 353 с

36. Матвеев Л.Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. Л.: Гидрометеоиздат. 1991. 295 с.

37. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. Л. Гидрометеоиздат. 1984. 751 с.

38. МВК ПГНИУ-Кеплер. URL: http://wiki.hpc.psu.ru/cluster/kepler/main (дата обращения 10.01.2018).

39. Метеосервис НОЦ ПиРВ. [Электронный ресурс]: URL: http://meteo.hpc.psu.ru (дата обращения 20.07.2018).

40. Методический кабинет Гидрометцетра России. [Электронный ресурс]: URL: http://method.meteorf.ru/ (дата обращения 20.07.2018).

41. Мучник В.М. Физика грозы. Л., Гидрометеоиздат. 1974. 352с.

42. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724-2009. Обнинск: ИГ-СОЦИН. 2009. 50 с.

43. Пермский ЦГМС. [Электронный ресурс]: URL: http://meteoperm.ru (дата обращения 20.07.2018). 44. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь. 2014. 298 с.

45. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Блинов Д.В. Технологическая линия системы краткосрочных прогнозов погоды COSMO-Ru с шагом сетки 7 км. // Труды Гидрометцентра России. 2012. Выпуск 347. С. 61–80.

46. Романский С.О., Вербицкая Е.М. Краткосрочный численный прогноз погоды высокого пространственного разрешения по Владивостоку на базе модели WRF–ARW // Вестник ДВО РАН. 2014. № 5 (177). С. 48–57.

47. Снитковский А.И. Смерчи в СССР // Метеорология и гидрология. 1987. № 9. С. 12–25.

48. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 5–32.

49. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М.: Триада-ЛТД. 2017. 166 с.

50. Толстых М.А., Ибраев Р.А., Володин Е.М., Ушаков К.В., Калмыков В.В., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Хабеев Р.Н. Модели глобальной атмосферы и Мирового океана: алгоритмы и суперкомпьютерные технологии: учебное пособие. Серия «Суперкомпьютерное образование». М.: Изд-во МГУ. 2013. 144 с.

51. Уральское УГМС. [Электронный ресурс]: URL:http:// svgimet.ru (дата обращения 20.07.2018).

52. Фрумин Г.Т., Иванов М.Э., Куликова Л.А., Еремина А.В. Подходы к решению проблемы диагноза и прогноза атмосферных осадков в интересах городских служб водоотведения // Общество. Среда. Развитие. 2016. № 2. С. 97–100.

53. Хромов С.П., Мамонтова Л. И., Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат. 1974. 568 с.

54. Шварц К.Г., Шварц Ю.А., Шкляев В.А. Двумерная модель мезомасштабных процессов в нижнем слое атмосферы с учетом неоднородности температуры и влажности воздуха // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8. № 1. С. 5–15.

55. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Математическое моделирование мезомасштабных и крупномасштабных процессов переноса примеси в бароклинной атмосфере. Перм.ун-т. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2015. 156 с.

56. Шихов А.Н. Быков А.В. База данных об опасных и неблагоприятных явлениях погоды в Пермском крае как региональный аналог ESWD // Географический вестник. 2014. №4. С. 102–109.

57. Шихов А.Н. Быков А.В. Изучение двух случаев сильных смерчей в Предуралье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 12. №3. М. 2015. С. 124–133.

58. Шихов А.Н. Быков А.В. Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13. №1. М. 2016. С. 137–148.

59. Шихов А.Н., Быков А.В., Ажигов И.О. Смерчи и шквалы на Урале в июне 2017 года: анализ по спутниковым данным. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Том 15. №1. М. 2018. С. 272– 281.

60. Шихов А.Н. Исследование последствий сильных шквалов и смерчей в Пермском крае с применением данных дистанционного зондирования Земли // Географический вестник. 2013. №1. С. 78–87.

61. Шихов А.Н. Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по многолетним рядам данных космической съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 21–30.
62. Шметер С. М. Физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеоиздат. 1972. 232 с.

63. Aligo E. A., Gallus W. A. On the impact of WRF model vertical grid resolution on Midwest summer rainfall forecasts. // Wea. Forecasting. 2009. Vol. 24 No. 2. P. 575–594.

64. Anderson-Frey A., Richardson Y., Dean A., Thompson R., Smith B. Investigation of Near-Storm Environments for Tornado Events and Warnings. // Weather Forecasting. 2016. No 31. P. 1771–1790.

65. Bedka K.M. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe // Atmospheric Research. Vol. 99(2). P. 175–189.

66. Bernier N., Belair S. High Horizontal and Vertical Resolution Limited-Area Model: Near-Surface and Wind Energy Forecast Applications // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2012. No. 51(6). 1061–1078.

67. Brooks H.E. Severe thunderstorms and climate change // Atmospheric Research. 2013. Vol. 123, 129–138.

68. Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Zakharchenko D.I., Mokhov I. I. Genesis Environments and Characteristics of the Severe Tornado in the South Urals on August 29, 2014. // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. Vol. 40, P. 794–799.

69. Clark A.J., Kain J.S., Marsh P.T., Correia J., Xue M., Kong F. Forecasting tornado pathlengths using a three-dimensional object identification algorithm applied to convection-allowing forecasts // Weather and Forecasting. 2012. Vol. 27(5), 1090–1113.

70. Coning E., Koenig M., Olivier J. The combined instability index: A new very-short range convection forecasting technique for southern Africa // Meteorol. App. 2010. No. 18. P. 421–439.

71. Das M.K., Das S., Chowdhury M.A.M., Karmakar S. Simulation of tornado over Brahmanbaria on 22 March 2013 using Doppler weather radar and WRF model // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2016. Vol. 7(5). P. 1577–1599.

72. Davies C.A., Brown B., Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Application to convective rain systems //Monthly Weather Review. 2006. Vol. 134(7). P. 1785–1795.

73. Davies J.M. Estimations of CIN and LFC associated with tornadic and non-tornadic supercells // Weather and Forecasting. 2004. Vol. 19(4). P. 714–726.

74. Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp J. Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing. // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2013. Vol. 110, P. 16361– 16366.

75. Dmitrieva T.G., Peskov B.E. 2016. Synoptic conditions, nowcasting, and numerical prediction of severe squalls and tornados in Bashkortostan on June 1, 2007 and August 29, 2014 // Russian Meteorology and Hydrology. No. 41(10). P. 673–682.

76. Doswell C.A., Shultz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // Electronic J. Severe Storms Meteorology. 2006. Vol. 1. No 3. P. 122.

77. Dotzek N., Groenemeijer P. Feuerstein B., Holzer A.M. Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD // Atmospheric Research. 2009. Vol. 93, P. 575–586.

78.ERA5datadocumentation.[Электорнный ресурс]:URL: https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/ERA5+data+documentation.(да-та обращения 20.07.2018)

79. European Severe Weather Database [Электорнный ресурс]: URL: http://essl.org/cgi-bin/eswd/eswd.cgi (дата обращения 20.07.2018).

80. Fierro A.O., Mansell E.R., Ziegler C.L., MacGorman D.R. Application of a lightning data assimilation technique in the WRF-ARW model at cloud-resolving

146

scales for the tornado outbreak of 24 May 2011 // Monthly Weather Review. 2012. Vol. 140(8). P. 2609–2627.

81. Finch J., Bikos D. Russian tornado outbreak of 9 June 1984 // Electronic Journal of Severe Storms Meteorology. 2012. Vol. 7, P. 1–28.

82. Fujita T. T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales // Journal of Atmospheric Sciences. 1981. Vol. 38. P. 1511–1534.

83. Gálvez J. M., & Davison M. (2016). The Gálvez-Davison Index for tropicalconvection.[Электорнный pecypc]:URL:http://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/gdi/GDI\_Manuscript\_V20161021.pdf

84. George J.J. Weather Forecasting for Aeronautics // New York and London Academic Press. 1960. 673 p.

85. 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 SPEC. ISS.), P. 473-487.

86. Jirak I.L., Cotton W.R. Observational analysis of the predictability of mesoscale convective systems // Wea. Forecasting. 2007. Vol. 22. P. 813–838.

87. Jung T., Miller M.J., Palmer T.N. et al. High-resolution global climate simulations with the ECMWF model in Project Athena: Experimental design, model climate, and seasonal forecast skill // J. Climate. 2012. Vol. 25. No. 9. – P. 3155 – 3172.

88. Jurgen Gracier. Convection parameters [Электронный ресурс]: URL: http://www.juergen-grieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf (дата обращения 20.07.2018).

89. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // Science. 2013. Vol. 342, P. 850–853.

90. Henry N.L. A Static Stability Index for Low-Topped Convection. // Weather Forecasting. No 15. 2000. P. 246 – 254.

91. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V. Forecasting mesoscale convective systems in the Urals using the WRF model and remote sensing data // Russian Meteorology and Hydrology. 2017. Vol. 42(1). P. 9–18.

92. Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2007 Vol.7, P. 327–342.

93. Kurgansky M.V, Chernokulsky A.V. Mokhov I.I. The tornado over Khanty-Mansiysk: An exception or a symptom? // Russian Meteorology and Hydrology. 2013. Vol. 38, P.539–546.

94. Litta A. J., Mohanty U. C., Das S., and Mary Indicula S. Numerical simulation of severe local storms over east India using WRF-NMM mesoscale model. // Atmos. Res. 2012. Vol. 116. P. 161–184.

95. Maddox R.A. Mesoscale convective complexes. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1980. Vol. 61. P. 1374–1387.

96. Matsangouras I.T., Pytharoulis I., Nastos P.T. Numerical modeling and analysis of the effect of complex Greek topography on tornadogenesis. // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014. Vol. 14(7). P. 1905–1919.

97. Milbrandt J, Bélair S, Faucher M, Vallée M, Carrera M, Glazer A. The Pan-Canadian High Resolution (2.5 km) Deterministic Prediction System // Weather Forecasting. 2016. No 31. P. 1791–1816.

98. Miller R.C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Center // Tech. Report No 200. Scott AFB. Illinois. 1972. 190 p.

99. NOMADS-NOAA Operational Model Archive and Distribution System. [Электронный pecypc]: URL: http://nomads.ncep.noaa.gov/ (дата обращения 20.07.2018).

100. Novitskii M.A., Pavlyukov Y.B., Shmerlin B.Y., Makhnorylova S.V., Serebryannik N.I., Petrichenko S.A., Tereb L.A., Kalmykova O.V. The tornado in Bashkortostan: the potential of analyzing and forecasting tornado-risk conditions // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. Vol. 41(10). P. 683–690.

101. OpenGrADS Documentation. [Электронный ресурс]: URL: http://wiki.opengrads.org/index.php?title=OpenGrADS\_Documentation (дата обращения 20.07.2018).

102. Qaddouri A. Nonlinear shallow-water equations on the Yin-Yang grid. Quart. J. Roy // Meteor. Soc. 2011. Vol. 137. P. 810–818.

103. Otkin J.A., Greenwald T.J. Comparison of WRF model-simulated and MODIS-derived cloud data // Monthly Weather Review. 2008. Vol. 136(6), P. 1957–1970.

104. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A baseline climatology of soundingderived supercell and tornado forecast parameters // Weather Forecasting. 1998. No. 13. P. 1148–1164.

105. Saha S., & Co-authors. The NCEP climate forecast system reanalysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 2010. Vol. 91. P. 1015–1057.

106. Skamarock W., Klemp J., Dudhia J., Gill D., Barker D. A description of the Advanced Research WRF version 3 / NCAR Tech., Note NCAR/TN-475+STR. 2008.

107. Shafer C.M., Mercer A.E., Doswell C.A., Richman M.B., Leslie L.M. Evaluation of WRF forecasts of tornadic and nontornadic outbreaks when initialized with synopticscale input. // Monthly Weather Review. 2009. Vol. 137(4). P. 1250–1271.

108. Sherburn K, Parker M, King J, Lackmann G. Composite Environments of Severe and Nonsevere High-Shear, Low-CAPE Convective Events // Weather Forecasting. 2016. No 31. P. 1899–1927.

109. Shikhov A.N., Tarasov A.V. Identification of tornado cases in a forest region using long-term series of remote sensing data. // Current problems in remote sensing of the Earth from Space. 2016. Vol. 13(3), P. 84–94.

110. Showalter A.K. A stability index for forecasting thunderstorms // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1947. No 34. P. 250–252.

111. Tajbakhsh S., Ghafarian P., and Sahraian F.: Instability indices and forecasting thunderstorms: the case of 30 April 2009 // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2012. Vol. 12, P. 403–413.

112. Taszarek M., Czernecki B., Walczakiewicz S., Mazur A., Kolendowicz L. An isolated tornadic supercell of 14 July 2012 in Poland – A prediction technique within the use of coarse-grid WRF simulation. // Atmospheric Research. 2016 Vol. 178–179. P. 367–379.

113. Thompson R.L., Edwards R., Hart J.A., Elmore K.L., and P. Markowski. Close procimity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle // Weather Forecasting. 2003. No 18. P. 1243–1261.

114. The Enhanced Fujita Scale (EF Scale). [Электронный ресурс]: URL: https://www.spc.noaa.gov/efscale/ (дата обращения 10.07.2018).

115. Tolstykh M.A., Volodin E.M., Kostrykin S.V., Fadeev R.Y., Shashkin V.V., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Mizyak V.G., Shlyaeva A.V., Geleyn J.-F., Ezau I.N., Yurova A.Y. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. Vol. 40(6). P. 374–382.

116. Working Group on Numerical Experementation. NWP systems (WGNE table). [Электронный ресурс]: URL: http://wgne.meteoinfo.ru/nwp-systems-wgne-table/ (дата обращения 24.11.2017).

117. Xue M., Hu M., Schenkman A.D. Numerical prediction of the 8 may 2003 Oklahoma City tornadic supercell and embedded tornado using ARPS with the assimilation of WSR-88D data // Weather and Forecasting. 2014. Vol. 29(1). P. 39–62.

118. Zängl G., Reinert D., Rıpodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 2015. Vol. 141. P. 563–579.

119. Zomeren J., Delden A. Vertically integrated moisture flux convergence as a predictor of thunderstorms. // Atmosperic Research Volume 83, Issues 2–4, February 2007. P. 435–445.