

*На правах рукописи*



Быков Алексей Васильевич

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

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Пермь – 2018

Работа выполнена на кафедре метеорологии и охраны атмосферы ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

**Научный руководитель:** **Калинин Николай Александрович,**  
доктор географических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Рубинштейн Константин Григорьевич,**  
доктор физико-математических наук, старший  
научный сотрудник, ФГБУ «Гидрометцентр Рос-  
сии», старший научный сотрудник (г. Москва)

**Гурьянов Владимир Владимирович,**  
кандидат географических наук, доцент,  
Казанский (Приволжский) федеральный универси-  
тет, доцент кафедры метеорологии, климатологии и  
экологии атмосферы (г. Казань)

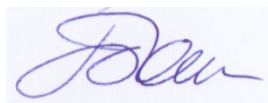
**Ведущая организация:** Национальный исследовательский Томский госу-  
дарственный университет (г. Томск)

Защита состоится 26 октября 2018 г. в 13.30 на заседании диссертационного совета Д 212.189.10 при ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, корп. 8, ауд. 215, email: meteo@psu.ru, факс (342)239-63-54.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научной библиотеки Пермского государственного национального исследовательского университета. Электронная версия текста диссертации и автореферата доступна на сайте ПГНИУ по адресу: <http://www.psu.ru> и официальном сайте ВАК РФ.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат географических наук, доцент



Татьяна Анатольевна Балина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 ней 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 CMC-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 METEOSAT-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, со-

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

## ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**1. Отечественная глобальная модель атмосферы ПЛАВ в сравнении с аналогами обладает наилучшим качеством воспроизведения синоптического положения на территории Урала, что обеспечивает лучшую достоверность прогноза опасных метеорологических явлений конвективного происхождения при помощи физико-статистических параметров неустойчивости.**

Всего 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 МКС, а в 9 случаях по данным сети метеостанций наблюдались

ОЯ или комплекс неблагоприятных метеорологических явлений (КНЯ) конвективного характера. Таким образом, три раза МКС, 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.

Данные об опасных метеорологических явлениях были взяты из разработанной автором оперативно пополняемой базы данных опасных метеорологических явлений, содержащей сведения, полученные не только по результатам стандартных метеорологических наблюдений, но и спутникового мониторинга, а также сбора свидетельств очевидцев.

По выходным данным прогностических моделей производился расчет физико-статистических параметров (индексов) неустойчивости, по грациям значений которых оценивалась вероятность возникновения ОЯ конвективного характера. Рассчитывались значения следующих индексов неустойчивости: доступная потенциальная энергия неустойчивости (CAPE), индекс плавучести (LI), энергия противодействия конвекции (CIN), индекс потенциальной неустойчивости (EPI), индекс Вайтинга (K), индекс Томпсона (TI), индекс мезомасштабных конвективных систем (MCS), индекс опасной погоды (SWEAT), относительная завихренность (SRH). Для расчета были использованы выходные данные прогностических моделей GFS и ПЛАВ от 0 ч ВСВ на срок 27 ч с шагом по времени 3 ч. Расчет проводился только для случаев, когда формировались условия, способствующие развитию глубокой конвекции. Расчет значений индексов CIN и SRH по данным модели ПЛАВ не производился. 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. 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. 1 и 2.

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. 1), 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.

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

| Индекс      | Параметр           |                        |                   |             |                           |
|-------------|--------------------|------------------------|-------------------|-------------|---------------------------|
|             | 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                 |

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% (табл. 2). 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.

По модели ПЛАВ качество прогноза МКС оказалось лучше, чем по GFS, так как модель ПЛАВ только в одном случае (31.07.2016) не воспроизвела текущее синоптическое положение. По модели ПЛАВ наилучшие значения критерия Пирса-Обухова отмечены у различных разновидностей индексов CAPE и LI (табл. 2), 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 обладает индекс Томпсона.

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.

Таблица 2

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

| Индекс      | Параметр           |                        |                   |             |                           |
|-------------|--------------------|------------------------|-------------------|-------------|---------------------------|
|             | Пороговое значение | Критерий Пирса-Обухова | Ложные тревоги, % | Пропуски, % | Оправдавшиеся прогнозы, % |
| 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 CAPE | 2500/700           | 0/0,17                 | 0/18,4            | 57,1/22,4   | 42,9/59,2                 |
| 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                 |

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.

**2. Созданная модификация индекса плавучести, основанного на известном методе частицы, позволила увеличить количество оправдавшихся прогнозов опасных метеорологических явлений конвективного происхождения.**

Для прогноза МКС в синоптических ситуациях со слабым динамическим фактором была разработана модификация 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. 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  $-10^{\circ}\text{C}$ . 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  $-10^{\circ}\text{C}$ ;  $MULI_{0-180,0}$ ,  $MULI_{0-180,-20}$ ,  $MULI_{0-180,-40}$  — отклонение кривой стратификации от кривой состояния для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя до уровня изотерм 0,  $-20$  и  $-40^{\circ}\text{C}$  соответственно.

Индекс обращается в ноль в том случае, если уровень конденсации располагается выше изотермы  $0^{\circ}\text{C}$ , либо если уровень конвекции располагается ниже изотермы  $-40^{\circ}\text{C}$ , что позволит уменьшить процент ложных тревог по сравнению с индексом плавучести (LI). Отрицательные значения индекса указывают на возможность развития МКС с опасными явлениями (рис. 1).

Установлено, что для разработанного индекса характерен низкий процент неоправдавшихся прогнозов и относительно высокий процент ложных тревог (табл. 2). Пример применения разработанного индекса представлен на рис. 1. Заметно, что поле его отрицательных значений занимает меньшую площадь, чем у MU PBL Lifted Index, что указывает на снижение числа ложных тревог.

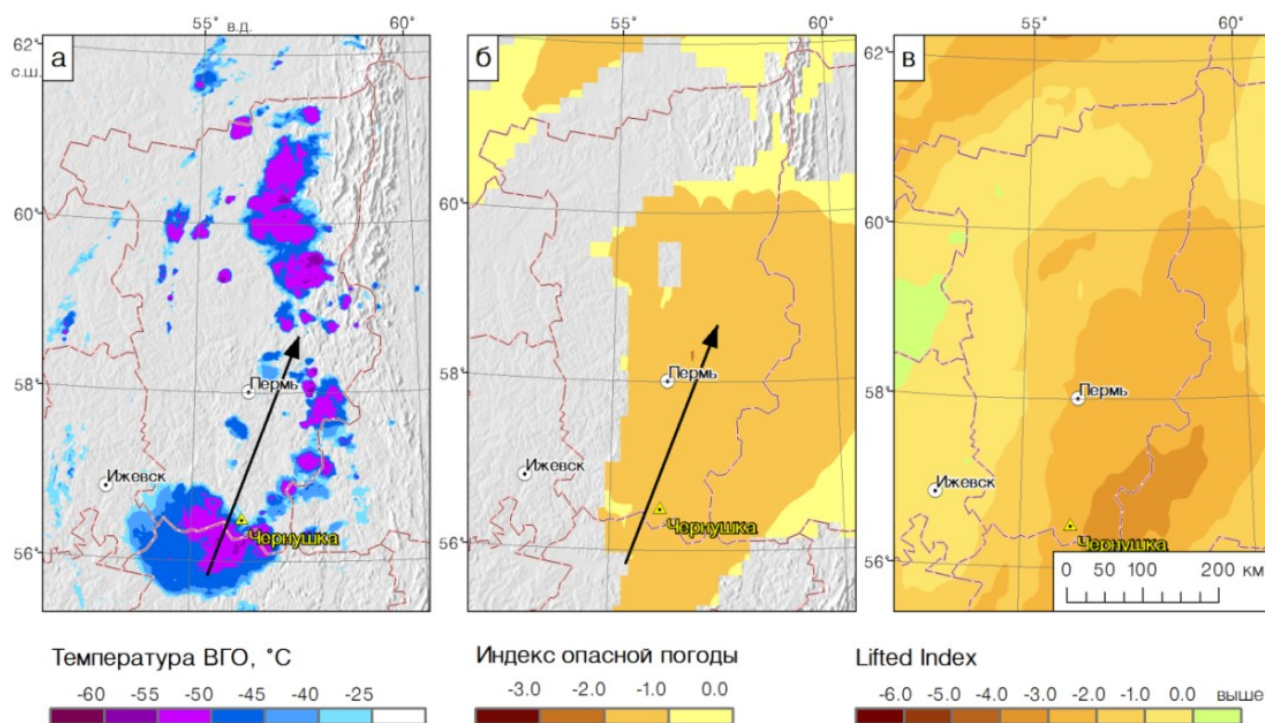


Рис. 1. Прогноз МКС 12.07.2018 (модель ПЛАВ): а) температура ВГО, снимок AQUA в 9 ч 20 мин ВСВ; б) прогностическое поле индекса опасных явлений в 9 ч ВСВ; в) прогностическое поле индекса плавучести в 9 ч ВСВ.

**3. Диагноз и прогноз мезомасштабных конвективных систем и связанных с ними опасных метеорологических явлений на Урале возможно осуще-**

**ствлять с помощью созданной конфигурации мезомасштабной модели атмосферы WRF, включающей прямое моделирование конвективных течений без использования процедур параметризации конвекции.**

Для оценки преимуществ или недостатков прямого моделирования конвекции над исследуемой территорией в сравнении с применением ее параметризаций, было проанализировано 6 случаев развития МКС с сильными ливнями, шквалами и градом (наблюдавшихся в 2002—2010 гг.). Запуск модели WRF производился с использованием трех различных схем параметризации конвекции при шаге сетки 10 км, а также с отключенной параметризацией, т.е. в режиме прямого воспроизведения конвективных течений (при шаге сетки 4 и 10 км). В качестве начальных и граничных условий использовался реанализ NCEP-CFS. 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. В результате эксперимента установлено, что прямое моделирование конвекции на сетке с горизонтальным разрешением 4 км обеспечивает получение более качественного прогноза, чем использование любой из предложенных в модели схем параметризации конвекции.

Для оценки качества моделирования мезомасштабных конвективных систем на сетке с высоким пространственным разрешением был проведен эксперимент по моделированию глубокой конвекции для 22 случаев возникновения крупных МКС на территории Пермского края с 2004 г. В качестве начальных и граничных условий использовался реанализ NCEP-CFS. Проверочным материалом для оценки качества моделирования послужили данные МРЛ и спутниковые снимки Terra/Aqua MODIS. Процедура верификации проводилась на основе объектно-ориентированного подхода. Установлено, что в половине рассмотренных случаев результаты моделирования 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). Также установлено, что модель WRF не воспроизводит развитие систем глубокой конвекции при определенных типах синоптических положений, когда отсутствуют выраженные зоны сходимости воздушных течений.

С целью оценки влияния горизонтального шага сетки на качество воспроизведения мезомасштабных конвективных систем был проведен эксперимент для 4 случаев возникновения МКС из предыдущего эксперимента. установлено, что результаты моделирования с разным (даже близким, например 3 и 4 км) шагом сетки могут принципиально различаться. Лишь в одном из рассмотренных случаев 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 улучшить воспроизведение опасных метеорологиче-

ских явлений (сильных ливней и шквалов), связанных с развитием МКС. Пример успешного воспроизведения МКС моделью WRF на сетках с различным горизонтальным разрешением приведен на рис. 2.

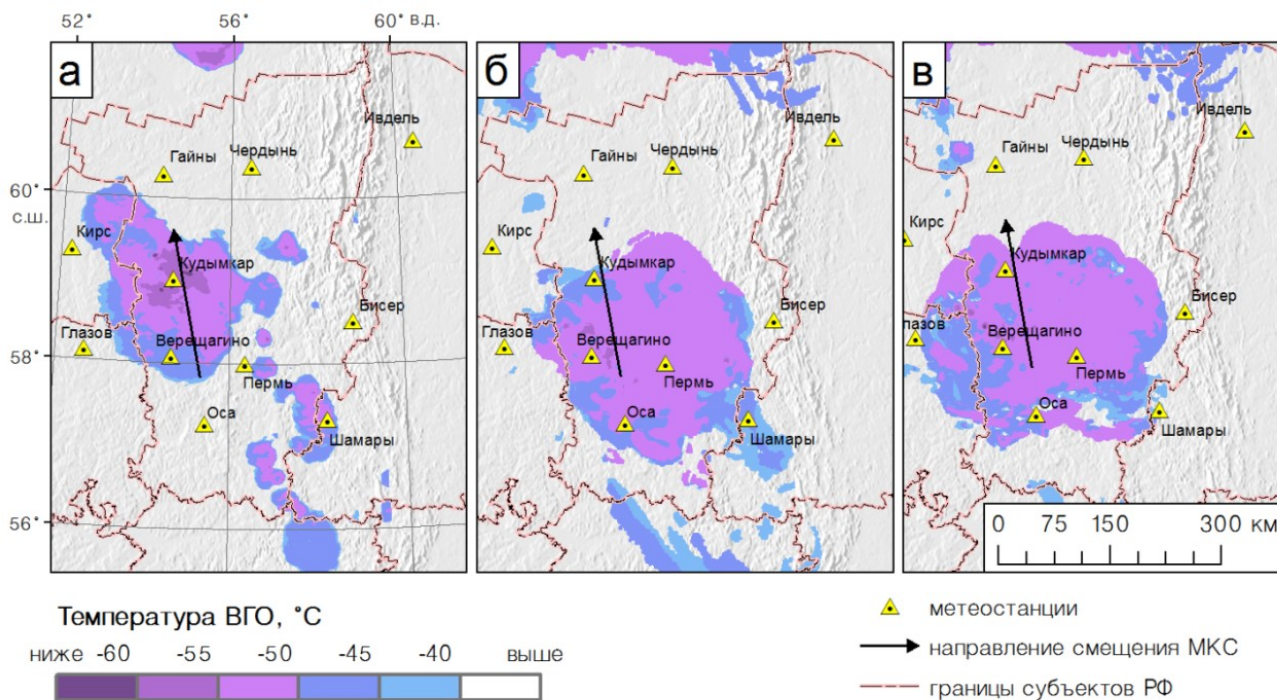


Рис. 2. Температура верхней границы облаков, 18.07.2012 г. в 10 ч ВСВ: а) по спутниковым данным MODIS; б) по модели WRF, расчет с шагом сетки 9 км; в) по модели WRF, расчет с шагом сетки 2 км.

Для оценки качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на сетке с высоким горизонтальным разрешением был проведен эксперимент на независимой выборке 14 случаев возникновения МКС в теплый период 2016 г. Для прогноза использовалась мезомасштабная модель атмосферы WRF с динамическими ядрами ARW и NMM. Воспроизведение глубокой конвекции производилось в режиме прямого моделирования без использования процедур параметризации на сетке с высоким горизонтальным разрешением (3 км). В качестве начальных и граничных условий были использованы прогностические данные модели NCEP-GFS с пространственным разрешением  $0.5^\circ$ , а также данные объективного анализа этой модели за предыдущие 12 ч. В качестве критериев оценки качества прогноза учитывалось расстояние между фактическим и модельным положением МКС в момент получения спутникового снимка (ошибка по положению), а также значение температуры ВГО по данным MODIS и по модели. Процедура верификации проводилась на основе объектно-ориентированного подхода.

Установлено, что модель WRF не воспроизводит развитие глубокой конвекции во внутримассовых ситуациях, когда отсутствует выраженная сходимость воздушных течений. Более надежные прогнозы получены в случаях, когда МКС формировались на хорошо выраженных атмосферных фронтах и на фоне высокого общего влагосодержания атмосферы. В подавляющем большинстве случаев

модель WRF воспроизводит мезомасштабные конвективные системы с ошибкой по времени и пространству. Оценка качества прогноза приведена в табл. 3.

Таблица 3

**Оценка качества прогноза моделью WRF мезомасштабных конвективных систем в теплый период 2016 года**

| Динамическое ядро                                                       | ARW | NMM |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|-----|
| Количество оправдавшихся прогнозов                                      | 1   | 2   |
| Количество прогнозов с незначительным сдвигом по времени и пространству | 9   | 8   |
| Количество неоправдавшихся прогнозов                                    | 4   | 4   |

Относительно оценки прогноза самих ОЯ стоит отметить существенное различие между динамическими ядрами ARW и NMM по характеру ошибок (пропусков и ложных тревог). Так, для модели WRF-ARW более характерны ошибки пропуска явления, а для модели WRF-NMM — ложные тревоги. Модель WRF-NMM дает меньшее число пропусков, но значительно завышает количество ливневых осадков и дает большое число ложных тревог по сильным ливням.

Таким образом, модель WRF с высоким пространственным разрешением в большинстве случаев воспроизводит МКС 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 МКС 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 МКС по мезомасштабной модели. Таким образом, качество прогноза может повышаться по мере совершенствования глобальных моделей.

**4. Созданная конфигурация модели WRF с высоким пространственным разрешением расчетной области позволяет проводить диагноз и прогноз мезомасштабных конвективных систем с сильными смерчами на территории Урала.**

Для оценки качества моделирования мезомасштабной моделью атмосферы WRF систем глубокой конвекции с сильными смерчами на Урале была рассмотрена выборка из 4 случаев. В двух случаях проводилось моделирование МКС с сильными смерчами 7 июня 2009 г. и 29 августа 2014 г. В двух других случаях подобранная конфигурация мезомасштабной модели WRF использована для прогноза МКС с сильными смерчами на независимой выборке 2017 года. Для оценки качества прогноза использована температура верхней границы облачности, полученная со спутников Terra/Aqua MODIS и Meteosat-8.

Для моделирования и прогноза использована мезомасштабная модель атмосферы WRF с динамическими ядрами ARW и NMM как с применением вложенных расчетных областей, так и без них. Обнаружена зависимость качества прогно-

за от качества воспроизведения синоптического положения глобальными моделями атмосферы, выступающих в качестве начальных и граничных условий. Установлено, что применение вложенных расчетных областей не повлекло за собой улучшения качества диагноза и прогноза МКС со смерчами.

Показано, что модель WRF-ARW с горизонтальным разрешением 3 км без использования вложенных расчетных областей может быть успешно использована для прогноза МКС со смерчами, что подтверждается двумя успешными прогнозами для случаев 2017 г (табл. 4). 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.

Таблица 4

**Сопоставление прогноза МКС с применением модели WRF-ARW/NMM  
с данными спутника Meteosat-8**

| Дата,<br>время<br>(BCB)             | Динамиче-<br>ское ядро | Горизонталь-<br>ный шаг сетки<br>модели, км | Температура верхней<br>границы<br>облачности, °C<br>(данные Meteosat/дан-<br>ные<br>модели WRF) | Расстояние<br>между фактиче-<br>ским и модель-<br>ным положени-<br>ем МКС, км | Ошибка<br>по време-<br>ни, ч |
|-------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 03.06.2017<br>,<br>11.00 –<br>12.00 | ARW                    | 7,2                                         | –62/–61                                                                                         | 40                                                                            | +1,25                        |
|                                     |                        | 3                                           | –62/–61                                                                                         | 10                                                                            | 0                            |
|                                     |                        | 3<br>(вложенная)                            | –62/–62                                                                                         | 0                                                                             | –0,5                         |
|                                     | NMM                    | 5,1                                         | –62/–63                                                                                         | 50                                                                            | +3,0                         |
|                                     |                        | 2,1                                         | –62/–62                                                                                         | 50                                                                            | +2,5                         |
| 18.06.2017<br>,<br>11.00 –<br>12.00 | ARW                    | 7,2                                         | –64/–62                                                                                         | 35                                                                            | +1,5                         |
|                                     |                        | 3                                           | –64/–64                                                                                         | 10                                                                            | +1,5                         |
|                                     |                        | 3<br>(вложенная)                            | –64/–62                                                                                         | 15                                                                            | +2,5                         |
|                                     | NMM                    | 5,1                                         | –64/–64                                                                                         | 15                                                                            | +2,0                         |
|                                     |                        | 2,1                                         | –64/–65                                                                                         | 20                                                                            | +2,0                         |
|                                     |                        | 1,7<br>(вложенная)                          | –64/–62                                                                                         | 15                                                                            | +2,0                         |

### 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 значения 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°C.

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 сверхкраткосрочного 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 METEOSAT 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 МКС 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.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК:**

1. **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.

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

3. **Быков А.В.**, Шихов А.Н. Оценка достоверности прогноза мезомасштабных конвективных систем в Пермском крае с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Выпуск 653. Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского. 2016. С. 33–35.

4. Калинин Н.А., Шихов А.Н., **Быков А.В.** Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология, 2017. № 1. С. 16–28.

5. 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.

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

7. 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. Том 13. № 1. М. 2016. с. 137–148.

#### **Статьи в журналах и научных сборниках.**

8. Шихов А.Н., **Быков А.В.** База данных об опасных и неблагоприятных явлениях погоды в Пермском крае как региональный аналог ESWD // Географический вестник. Пермь. 2014. С. 102–109.

9. Шихов А.Н., **Быков А.В.** Открытая база данных об опасных явлениях погоды Пермского края // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края. Пермь. 2014. С. 122–130.

#### **Материалы конференций.**

10. **Быков А.В.**, Калинин Н.А., Шихов А.Н. Применение модели WRF для прогноза опасных метеорологических явлений летнего периода в Пермском крае. Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века. Труды III международной конференции. Казань. 2017. С. 128–130.

11. **Быков А.В.**, Калинин Н.А., Шихов А.Н. Прогноз опасных и неблагоприятных явлений погоды на Среднем Урале с применением мезомасштабной модели WRF. Сборник докладов всероссийской конференции “Современные проблемы географии и геологии. К 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете”. Томск. 2017. С. 223–226.

12. **Быков А.В.**, Пьянков С.В., Шихов А.Н. Разработка WEB-ресурса для мониторинга опасных гидрометеорологических явлений в Пермском крае. Тезисы докладов Всероссийской конференции "Обработка пространственных данных и дистанционный мониторинг природной среды и масштабных антропогенных процессов (DPRS2013)" (30 сентября – 4 октября 2013 г.). Барнаул. 2013. С. 66.

13. **Быков А.В.**, Шихов А.Н. Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением прогностических моделей. Тезисы докладов Пятнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (13–17 ноября 2017). Дистанционные методы исследования атмосферных и климатических процессов. М. 2017. С. 156.

14. Калинин Н.А., Шихов А.Н., **Быков А.В.**, Чернокульский А.В. Условия возникновения сильных смерчей над территорией России: анализ и моделирование с помощью модели WRF. Тезисы докладов Пятнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (13–17 ноября 2017). Дистанционные методы исследования атмосферных и климатических процессов. М. 2017. С. 178.

15. Шихов А.Н., **Быков А.В.** Анализ качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS Тезисы докладов Тринадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (16–20 ноября 2015). Дистанционные методы исследования атмосферных и климатических процессов. М. 2015. С. 234.

16. Шихов А.Н., **Быков А.В.** Анализ условий развития сильных смерчей в Прикамье. География и регион: материалы междунар. науч.-практ. конф. (23–25 сентября 2015 г.). В 6 т. Т.IV: Гидрометеорология. Картография и геоинформатика. Пермь. 2015. С. 169–174.

#### **Свидетельство на программный продукт.**

17. **Быков А.В.**, Шихов А.Н. База данных «Опасные природные явления Пермского края». Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22.10.2015. № 2015621594.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **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

1.2. Физико-статистические параметры неустойчивости

1.2.1. Индексы, основанные на методе частицы

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 атмосферы

1.2.4. Комплексные индексы неустойчивости

1.3. Современные глобальные модели атмосферы

1.4. Современные мезомасштабные модели атмосферы

1.5. Выводы по главе 1

#### **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

2.2. Система получения модельных данных

2.3. Реализация расчета индексов неустойчивости в OpenGrADS

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

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

2.6. Выводы по главе 2

### 3. ПРОГНОЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ КОНВЕКТИВНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕЗО-МАСШТАБНЫХ 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 NMM

3.5. Примеры моделирования мезомасштабных конвективных систем с опасными явлениями погоды

3.5.1. Мезомасштабный конвективный комплекс 18 июля 2012 года

3.5.2. Мезомасштабный конвективный комплекс 17 августа 2014 года

3.5.3. Мезомасштабный конвективный комплекс 24—25 июля 2015 года

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

3.7. Выводы по главе 3

### 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

4.1.2. Анализ смерчеопасной ситуации 7 июня 2009 года

4.1.3. Анализ смерчеопасной ситуации 29 августа 2014 года

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

4.2.1. Условия развития шквалов и смерчей 3 июня 2017 года

4.2.2. Условия развития шквалов и смерчей 18 июня 2017 года

4.2.3. Анализ результатов прогноза мезомасштабных конвективных систем со смерчами

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

4.3.1. Синоптические условия формирования смерчей

4.3.2. Численное моделирование мезомасштабных конвективных систем со смерчами

4.4. Выводы по главе 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК