

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)



На правах рукописи
УДК 551.509.313.4:551.43

Исаев Эркин Кубанычевич

Гидродинамическое моделирование атмосферных процессов
над территорией со сложной орографией

Специальность: 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор, Смышляев Сергей Павлович

Научный консультант: Кандидат физико-математических наук, доцент Анискина Ольга Георгиевна

Официальные оппоненты: Крупчатников Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий отделом вычислительных и информационных технологий в гидрометеорологии Федерального государственного бюджетного учреждения «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт», г. Новосибирск.

Курзенева Екатерина Владимировна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Финского Метеорологического Института, г. Хельсинки, Финляндия.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический Научно-Исследовательский Центр Российской Федерации», г. Москва.

Защита состоится «__» _____ 2017 г. в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр.,98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета.

Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу 192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, дом 79. Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д.212.197.01, Ученому секретарю.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент



Л. В. КАШЛЕВА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Прогноз полей метеорологических величин в горной местности является крайне сложной задачей из-за влияния, которое орография оказывает на формирование мезомасштабной циркуляции и теплового режима атмосферы. Наличие орографических и, как следствие, термических и динамических неоднородностей подстилающей поверхности приводит к появлению особенностей в развитии атмосферных процессов. Задача составления прогноза погоды в местности со сложным рельефом усложняется при использовании гидродинамического подхода, что объясняется влиянием мезомасштабных особенностей рельефа на возникновение процессов подсеточного масштаба, которые требуют особого подхода к своему описанию – параметризации. Кроме этого, качество гидродинамического моделирования сильно зависит от точности задания начальных данных, что также является особенно сложной задачей для территорий со сложным рельефом. Исследуемый регион в данной работе – территория Киргизии, где 94% территории занимают горы с высотой около 3000 м над уровнем моря.

Наибольшую опасность воздействия на экономику и население Киргизии представляют стихийные гидрологические явления, из которых самыми опасными являются сели и паводки, возникающие в результате таяния снега и ливневых дождей. Они причиняют крупный экономический ущерб и гибель люди. Кроме того, на территории Киргизии располагаются 2000 высокогорных прорывоопасных озер, которые имеют высокую вероятность прорыва из-за сильных осадков. Высокогорные территории в холодный период года подвержены воздействию снежных лавин (до 1500 сходов в год).

На все эти опасные явления влияют часто наблюдаемые в регионах со сложным рельефом сильные осадки (40-75 мм/сутки). Следовательно, прогноз стихийных явлений напрямую связан с прогнозом основных метеорологических величин — атмосферного давления, температуры воздуха, скорости и направления ветра, количества осадков.

До 2015 года в Гидрометцентре Киргизии не было гидродинамической модели, а для прогноза погоды использовались только синоптические методы. В 2014 году после рабочей поездки представителей Гидрометцентра Киргизии в Национальный Центр Атмосферных исследований (NCAR), было принято решение о создании системы гидродинамического моделирования атмосферных процессов на основе модели WRF-ARW, так как эта модель находится в открытом доступе. Данное исследование выполняется в целях осуществления этого решения и является пионерской работой. Результаты

данного исследования позволяют сегодня в Киргизии прогнозировать метеорологические поля с помощью системы гидродинамического моделирования атмосферных процессов на основе адаптированной гидродинамической модели Weather Research and Forecasting (WRF-ARW). В будущем планируется активно принимать участие в совещаниях и конференциях метеорологического сообщества, которое занимается развитием WRF-ARW.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод об *актуальности* данной работы. Применение гидродинамической модели атмосферы адаптированной к особенностям области интегрирования дает возможность корректно моделировать поля метеорологических величин, а, следовательно, и хорошо их прогнозировать.

Целью диссертационной работы является создание системы гидродинамического моделирования атмосферных процессов для территории со сложной орографией и ее тестирование для территории Киргизии.

Под системой гидродинамического моделирования понимается совокупность модулей подготовки начальных данных, адаптированного динамического ядра модели, оптимального комплекса параметризаций физических процессов, постпроцессинга, верификация результатов прогнозов и рекомендации по технологии осуществления прогностических действий с использованием гидродинамической модели WRF-ARW.

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе сформулированы и решены следующие задачи:

- Адаптация и оптимизация атмосферной гидродинамической модели Weather Research and Forecasting (WRF- ARW) для территории со сложным рельефом и её тестирование для Киргизии;
- Адаптация и оптимизация методов верификации гидродинамического прогноза метеорологических величин в случае моделирования на территории со сложной орографией;
- Оценка чувствительности гидродинамического моделирования атмосферных процессов на территории со сложной орографией к параметризациям физических процессов;
- Модификация схемы параметризации пограничного слоя атмосферы для применения на территории со сложной орографией;
- Разработка комплекса ассимиляции данных наблюдений наземных метеорологических станций в гидродинамическую модель для территории Киргизии и оценка его эффекта;
- Верификация созданной системы гидродинамического моделирования

атмосферных процессов на территории Киргизии.

Научная новизна. В процессе выполнения исследования атмосферных процессов на территории со сложной орографией были получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые создана система гидродинамического моделирования атмосферных процессов для территории Киргизии, которая может быть применена для моделирования процессов в других областях со сложным рельефом.
2. Исследовано взаимодействие крупномасштабного потока и мезомасштабных процессов, а также влияние мелкомасштабных физических процессов на формирование горной погоды.
3. Получены новые оценки чувствительности гидродинамического моделирования на территории со сложной орографией к параметризации пограничного слоя атмосферы.
4. Модифицирована схема параметризации пограничного слоя атмосферы для применения при моделировании на территории со сложным рельефом.
5. Получены оценки чувствительности регионального гидродинамического моделирования к усвоению данных метеорологических станций Киргизии.

Научная и практическая значимость результатов:

– Полученные результаты могут быть полезны для проведения исследований атмосферных процессов на территории со сложной орографией в других районах земного шара;

– Материал диссертации может служить обоснованием необходимости усвоения данных наблюдений в регионе со сложной орографией для улучшения качества прогноза;

– Созданная система гидродинамического прогноза атмосферных процессов внедрена и используется в оперативном режиме в Агентстве по гидрометеорологии при МЧС Киргизской Республики (сертификат о внедрении №06/1191 от 29.05.2015).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Методология краткосрочного гидродинамического прогноза погоды над территорией со сложной орографией.

2. Результаты исследования чувствительности гидродинамического моделирования атмосферных процессов на территории со сложной орографией к выбору комплекса параметризаций физических процессов.

3. Модифицированная для применения при гидродинамическом моделировании процессов в регионах со сложной орографией схема параметризации планетарного пограничного слоя атмосферы и результаты её верификации.

4. Результаты исследования взаимодействия крупно- и мезомасштабных потоков, определяющих погоду на территории со сложной орографией;

5. Результаты исследования влияния ассимиляции данных измерений метеорологических станций в горных регионах на качество моделирования.

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается строгой математической постановкой задачи, корректным использованием методов оценки гидродинамического моделирования, корректным использованием метеорологических данных для формирования исходной информации о метеорологических полях, а также непротиворечивостью результатов другим независимым исследованиям по данной тематике. Обоснованность основных результатов подтверждается публикациями в российских и зарубежных изданиях, а также выступлениями с докладами на российских и международных конференциях.

Личный вклад автора заключается в формулировке целей и постановке задач исследования, обосновании выбора теоретических и расчетных методов решения поставленных задач, анализе полученных данных и их интерпретации. Автор непосредственно устанавливал гидродинамическую модель WRF-ARW и адаптировал её к территории Киргизии, модифицировал схему параметризации пограничного слоя атмосферы, проводил исследования и обрабатывал данные численных экспериментов, составлял отчетную документацию, подготавливал материалы докладов и публикаций, формулировал выводы и заключения по работе, разрабатывал рекомендации для практического использования. Все выносимые на защиту положения основаны на результатах исследований, проведенных автором самостоятельно.

Апробация результатов. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на сессиях Ученого Совета и межкафедральных семинарах РГГМУ (2015 - 2017 г.), на совещаниях в Гидрометцентре Киргизии (2015 – 2017 г.), на шестой Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (г. Томск, Россия, 2013 г.), на четвертой Международной молодежной научно-практической конференции «Молодая наука – 2016» (г. Туапсе, Россия, 2016 г.)

Основные публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано пять научных работ, в том числе 4 публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 148 страниц, в том числе 46 рисунков и 18 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 147

наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность к.ф.-м.н. С.В. Мостаманди за очень полезные технические консультации.

Основное содержание работы

Во введении приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы, описываются рассматриваемые проблемы, ставятся задачи диссертационного исследования, обосновывается научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и определяются положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор исследований по влиянию сложной орографии на поля метеорологических величин, а также работ по моделированию метеорологических процессов в регионах со сложной орографией.

Для решения задачи прогнозирования погоды необходимо изучение местных особенностей формирования локальной погоды, местных циркуляций. Поэтому необходима метеорологическая информация, которой всё еще недостаточно, вследствие очень ограниченного количества данных наблюдений горных метеорологических станций. Однако для изучения особенностей региональной циркуляции в горах сейчас доступен аппарат численного моделирования.

В разделе 1.1 дается обзор существующих исследований в области горной метеорологии. Одна из первых работ в этой области – исследование Х. П. Уилсона, в которой приведены методики оценки параметров возникновения эффекта деформации поля приземного давления в результате торможения горами атмосферного потока в нижнем слое атмосферы. Детальный физический и синоптический анализ взаимодействия атмосферы и горных хребтов сделал Н.В. Петренко в исследованиях 1948 года. В исследовании 1967 года А.И. Ромовым было установлено, что барьерный эффект приводит не только к усилению вихреобразования, но и к деформации самого термического поля. В работе 1974 года М.А. Петросянц исследовал влияния орографии на метеорологические процессы Средней Азии. В монографии 1984 года Р. Барри собрал огромное количество результатов теоретических и экспериментальных исследований. Очень обширный и глубокий обзор исследований в области горной метеорологии сделан в монографии И.Н. Русина, посвященной анализу физики атмосферных процессов над горами в зависимости от масштабов

явления. В исследовании 1999 года В. Н. Кожевников установил фундаментальные свойства потока, возникающие при обтекании гор, и установил зависимости характеристики потока от высоты и формы гор. В диссертационном исследовании используются и развиваются все достижения перечисленных авторов.

В разделе 1.2 дается обзор о современном состоянии численного прогноза погоды на территории со сложной орографией. Рассматриваются результаты исследований А. В. Сеньковой по учёту орографических эффектов при расчете потоков радиации в гидродинамических моделях высокого разрешения. И. Бастард и Р. Б. Смит определили проблемы верификации гидродинамического прогноза осадков на территории со сложной орографией. Н. М. Гаврилов исследовал поляризационные соотношения для мезомасштабных стационарных орографических волн при расчете суммарного вертикального потока волновой энергии. Лаура Ронту исследовала влияние параметризации орографии на качество моделирования атмосферных процессов над территорией со сложной орографией и предложила методы расширенной диагностики и валидации параметризации натекающего потока на территории со сложным рельефом.

В разделе 1.3 излагается общая формулировка используемой в работе гидродинамической модели атмосферы Weather Research and Forecasting (WRF) с динамическим ядром Advanced Research (ARW) (версия 3.6.1), которое базируется на основных уравнениях гидродинамики атмосферы.

В разделе 1.4 рассмотрены особенности региона, для которого создаётся система гидродинамического моделирования атмосферных процессов – топография и климат Киргизии, 94% территории которой занимают горы с высотой около 3000 м над уровнем моря.

Для адаптации модели WRF к конкретной области моделирования – в данном исследовании к территории Киргизии, характеризующейся сложной орографией, – необходимо провести численные эксперименты по выбору оптимальных характеристик области моделирования и оптимального набора параметризаций физических процессов.

Численные эксперименты по адаптации динамического ядра модели и исследованию влияния схем параметризации конвекции и микрофизики облаков на моделирование атмосферных процессов на территории Киргизии описаны во **второй главе**.

Во всех численных экспериментах, проведённых в рамках данного исследования, используется равноугольная коническая проекция Ламберта в декартовой системе координат, область моделирования охватывает всю территорию Киргизии и некоторые страны Центральной Азии. По вертикали используется учитывающая рельеф η координата, 35 уровней по вертикали.

Начальные и граничные данные получены с пространственным разрешением 1° из данных реанализа Национального Центра Атмосферных Исследований (NCAR). Во всех экспериментах используются следующие схемы параметризации физических процессов, исследование которых выходит за рамки поставленных задач:

Схема Mlawera– Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) для длинноволновой радиации,

Схема Dudhia для коротковолновой радиации,

Схема на основе теории подобия Мони́на-Обухова для приземного слоя,

Схема модели Noah для процессов на поверхности и в почве,

Схемы университета Йонсей (YSU) для пограничного слоя,

Схема Кима-Аракавы для гравитационных орографических волн.

Численные эксперименты проводились и верифицировались для всех сезонов. Начиная с 2015 года, разработанная система гидродинамического моделирования используется в оперативной практике, но в тексте диссертации приводятся результаты анализа для апреля и мая, так как именно в эти месяцы Гидрометцентр Киргизии даёт самые плохие прогнозы. Во второй главе анализируются результаты 342 численных экспериментов (прогнозов). Для оценки качества моделирования использованы данные девяти наземных станций, полученные из КыргызГидроМета. При верификации результаты модельного прогноза интерполировались в точку с координатами этих станций.

По результатам численных экспериментов и верификации для моделирования атмосферных процессов на территории Киргизии была выбрана оптимальная конфигурация модели

–расчетная область моделирования с сеткой размером 131 узлов с запад на восток и 69 узлов с юга на север,

–горизонтальное разрешение 10 км (в дальнейшем разрешение было изменено),

–шаг по времени 60 секунд,

–пространственное разрешение геофизических данных $30''$.

Было исследовано влияние разрешения задания орографии и начальных данных. Сделанный выбор обоснован результатами численных результатами численных экспериментов.

Далее варьировались методы параметризации конвекции и микрофизики облаков. В экспериментах участвовали пять методов описания конвекции

схема Каина-Фритша (KF),

старая схема Каина-Фритша (OKF),

схема Беттса-Миллер-Янич (BMJ),

ансамблевая схема Грелла-Дэвени (GD),
трёхмерная ансамблевая схема Грелла(G3D),
конвекция не параметризовалась (NC).

И три схемы описания микрофизических процессов:

схема Кесслера (KS),

схема WSM3,

схема WSM6.

Автор исследования отдаёт себе отчёт в том, что конвекция в модели с разрешением 10 км может быть сеточным процессом и в этом случае должна быть описана основными негидростатическими уравнениями, а значит, не может быть параметризована. Но как показали проведённые эксперименты, в данном регионе и при конкретных характеристиках модели конвекцию надо параметризовать.

В таблицах 1, 2 и 3 приведены результаты оценки качества моделирования в ситуациях наличия осадков (всего 109 случаев).

Таблица 1 – Средние абсолютные (δ), средние квадратические (σ) ошибки прогнозов в ситуациях наличия осадков при использовании различных схем параметризации конвекции

| Оцениваемая величина Хф | Среднее значение Хф и квадратическое отклонение $\sigma_{\text{ф}}$ | | Ошибки моделирования с использованием разных схем параметризации конвекции | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | NC | | KF | | BMJ | | GD | | G3D | | OKF | |
| | $X_{\text{ф ср}}$ | $\sigma_{\text{ф}}$ | δ | σ | δ | σ | δ | σ | δ | σ | δ | σ | δ | σ |
| Температура, °С | 18,0 | 6,0 | 1,2 | 0,8 | 1,3 | 0,8 | 1,3 | 0,8 | 1,3 | 0,7 | 1,3 | 0,7 | 1,2 | 0,7 |
| Давление, гПа | 1020,07 | 5,27 | 1,50 | 1,16 | 1,50 | 1,20 | 1,58 | 1,17 | 1,53 | 1,17 | 1,53 | 1,17 | 1,48 | 1,18 |
| Скорость ветра, м/с | 11,5 | 6,0 | 1,8 | 1,9 | 1,6 | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,6 | 1,9 |
| Осадки, мм/12 часов | 13,2 | 9,1 | 8,6 | 8,1 | 4,2 | 5,7 | 5,8 | 6,5 | 7,3 | 9,5 | 7,1 | 6,5 | 4,1 | 4,1 |

После анализа результатов численных экспериментов сделан вывод о том, что в целом для всей территории Киргизии схема параметризации конвекции Каина-Фритша обеспечивает хорошее качество моделирования метеорологических полей. Этот результат можно объяснить тем, что схема Каина-Фритша основана на методе потоков масс, в котором описываются восходящие и компенсирующие нисходящие потоки, что позволяет более корректно воспроизвести не только свободную и термическую, но и динамическую конвекцию, возникающую под влиянием орографии. Также в этой параметризации учитывается влияние конвекции не только на температуру

и влажность, но и на составляющие скорости ветра, а также рассматривается изменение процессов во времени, что не учитывается в остальных схемах. Вывод о том, что конвекция в рассмотренных численных экспериментах не является сеточным процессом сделан на основе того факта, что ни разу количество осадков не было предсказано выше фактического. Это позволяет говорить о том, что конвекция не описывается дважды – самими уравнениями (как сеточный процесс) и при параметризации (как подсеточный процесс).

Для параметризации микрофизических процессов наилучший результат показала схема WSM6 (таблица 2), в которой рассматривается 6 типов гидрометеоров: водяной пар, жидкие частицы облачности, кристаллы льда, дождь, снег и крупа. Схема Кесслера показала худшие результаты, что, скорее всего, связано с её простотой – учитывается только жидкая фаза облаков и осадков.

Таблица 2 – Средние абсолютные (δ), средние квадратические (σ) ошибки прогнозов в случаях наличия осадков при различных схемах параметризации микрофизических процессов

| Оцениваемая величина | Ошибки моделирования (δ и σ) с использованием разных схем параметризации микрофизики | | | | | |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | KS | | WSM3 | | WSM6 | |
| | δ | σ | δ | σ | δ | σ |
| Температура, °C | 1,4 | 0,9 | 1,3 | 1,1 | 1,2 | 0,7 |
| Давление, гПа | 1,70 | 1,71 | 1,67 | 1,56 | 1,48 | 1,18 |
| Скорость ветра, м/с | 1,7 | 2,0 | 1,7 | 2,2 | 1,6 | 1,9 |
| Осадки, мм/12 часов | 9,2 | 5,8 | 8,2 | 5,0 | 4,1 | 4,1 |

С целью повышения качества прогноза метеорологических полей были проведены численные эксперименты по гидродинамическому моделированию с увеличением горизонтального разрешения до 5 км.

Из анализа таблицы 3, в которой приведены ошибки прогноза метеорологических полей при разном разрешении модели, можно сделать

Таблица 3 – Средние абсолютные (δ), средние квадратические (σ) ошибки прогнозов в случаях наличия осадков при разном разрешении модели

| Оцениваемая величина | Ошибки (δ и σ) при разных шагах модели по горизонтали | | | |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| | 10 км | | 5 км | |
| | δ | σ | δ | σ |
| Температура, °C | 1,2 | 0,7 | 1,1 | 0,7 |
| Давление, гПа | 1,48 | 1,18 | 1,27 | 1,06 |
| Скорость ветра, м/с | 1,6 | 1,9 | 1,5 | 1,3 |
| Осадки, мм/12 часов | 4,1 | 4,1 | 3,6 | 3,5 |

можно сделать вывод о том, что качество моделирования метеорологических полей улучшается с увеличением горизонтального разрешения от 10 км до 5 км. Самое значительное увеличение точности наблюдается в прогнозе осадков (примерно на 4%). В связи с этим во всех дальнейших численных экспериментах будет использована модель с разрешением 5 км.

В третьей главе описываются эксперименты по выбору оптимальной комбинации параметризаций физических процессов, которая должна описывать очень сложные прямые и обратные связи между этими процессами.

Для верификации прогнозов с целью выбора оптимальной конфигурации использовались результаты наблюдения на 31 станции. Приведены данные верификации за апрель 2014 года – результаты 232 численных экспериментов с заблаговременностью 24 часа. Исследовалось совместное влияние параметризации конвекции, микрофизики облаков, длинноволновой и коротковолновой радиации, приземного и пограничного слоя атмосферы (ППС), процессов на подстилающей поверхности. Использовались восемь комбинаций (таблица 4) следующих параметризаций:

- Микрофизика облаков при помощи схем Лина (Lin) и WSM6;
- Длинноволновая радиация при помощи схем Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) и модифицированной RRTMG;
- Коротковолновая радиация при помощи схем Дудья (Dudhia) и RRTMG;
- Приземный слой при помощи схем MM5 на основе теории подобия Мони́на-Обухова (МО) и QNSE;
- Процессы на поверхности и в почве при помощи параметризации Noah;
- Пограничный слой при помощи схем YSU , Меллора-Ямады-Янича (MYJ) , Quasi-normal Scale Elimination (QNSE), Бужо-Лакаре (BL) ;
- Конвекция при помощи схем Каина-Фритша (KF), ансамблевой схемы Грелла (GR).

В скобках приведена аббревиатура, которая использована в дальнейшем.

Значительная сложность рельефа — глубокая и различная экспозиция горных склонов по отношению к солнцу и потокам воздуха, создаёт исключительные местные особенности, которые усложняют и прогноз метеорологических величин и его верификацию. Перед верификацией был проведён статистический анализ корреляционных связей полей прогнозируемых метеорологических величин и выявлены станции и узлы, между которыми существует значительная корреляция. Для верификации выбирались не самые ближайшие к станции модельные узлы, а те которым соответствуют самые большие коэффициенты корреляции.

В регионе со сложным рельефом локальные характеристики атмосферы в

Таблица 4 – Комбинации параметризаций физических процессов, используемые в работе

| № комбинаций | Схемы параметризации | | | | | | |
|--------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------|-------|-------------------|-----------|
| | Микро-физических процессов | Длинно-волновой радиации | Коротко-волновой радиации | Приземного слоя | Почвы | Пограничного слоя | Конвекции |
| 1 | WSM6 | RRTM | Dudhia | MM5 | Noah | YSU | Нет |
| 2 | Lin | RRTM | Dudhia | MO | Noah | MYJ | KF |
| 3 | Lin | RRTM | Dudhia | QNSE | Noah | QNSE | KF |
| 4 | Lin | RRTMG | RRTMG | MO | Noah | MYJ | KF |
| 5 | Lin | RRTMG | RRTMG | MO | Noah | BL | GD |
| 6 | WSM6 | RRTM | Dudhia | MO | Noah | MYJ | GD |
| 7 | WSM6 | RRTMG | RRTMG | MO | Noah | BL | KF |
| 8 | WSM6 | RRTMG | RRTMG | QNSE | Noah | QNSE | KF |

ППС меняются значительным образом во времени и по пространству и эта изменчивость представляет проблему для мезомасштабного моделирования. Более пристальное внимание при анализе результатов моделирования уделялось схеме параметризации ППС, которая полагалась основополагающей. В большинстве параметризаций ППС влияние неустойчивости учитывается через число Ричардсона (Ri), которое определяется по градиентам скорости и стратификации атмосферы. В среде, где ветры проявляют большую пространственную изменчивость, значение Ri неточно характеризует стратификацию. Кроме этого, схемы на основе кинетической энергии турбулентности (КЭТ) (1.5 порядка) должны быть более успешными в местности со сложной орографией, по сравнению со схемами первого порядка (К-схемы), которые не рассматривают перенос турбулентных величин.

Моделирование с использованием комбинации № 1, в которую входит параметризация пограничного слоя YSU, дает худшее качество прогноза температуры и скорости ветра. Схема YSU основана на методе К-профилей и, следовательно, имеет первый порядок замыкания, то есть в систему параметризующих уравнений входят моменты лишь первого порядка. Лучший же результат показывает использование комбинации № 7, в которой используется схема BL, имеющая 1.5 порядок и для замыкания использует прогностическое уравнение КЭТ.

При анализе полученных результатов обнаружено, что на некоторых станциях ошибки очень большие. Например, на станциях Ит-Агар и Кызыл-Суу абсолютные ошибки прогноза температуры достигают $9,2^{\circ}\text{C}$ и $8,0^{\circ}\text{C}$, соответственно. В процессе тщательного изучения обнаружена причина таких больших ошибок. Оказывается модельный узел и станция находятся на разных

высотах. Например, между станцией Ит-Агар, используемой для верификации, и модельным узлом разница высоты составляет 724 метра. Поэтому для учета разницы высоты вводилась поправка, рассчитываемая по формуле:

$$\Delta T_h = \Delta H \Delta \gamma, \quad (1)$$

где ΔH - разница высот (м),

$\Delta \gamma$ - среднее значение градиента температуры ($0,8^\circ\text{C}/100\text{м}$).

После введения поправки на высоту наблюдается уменьшение средних ошибок. Например, на станции Ит-Агар значение средней абсолютной ошибки прогноза температуры уменьшилась с $9,2^\circ\text{C}$ до $3,2^\circ\text{C}$, средней квадратической ошибки с $9,8^\circ\text{C}$ до $4,1^\circ\text{C}$, средней систематической ошибки с $-9,1^\circ\text{C}$ до $-2,1^\circ\text{C}$.

Для оценки качества прогноза скорости ветра и количества осадков построены таблицы сопряженности (таблица 5). Использовались три градации для осадков (0-5, 5-10, 10-30) мм/12 час и четыре для скорости ветра (0-5, 5-10, 10-15, 15-20) м/с. Таблицы сопряженности строились для каждой градации.

Таблица 5 – Пример таблицы сопряженности

| Прогноз по модели | Наблюдения на метеорологической станции | | |
|-------------------|-----------------------------------------|------------|-----------|
| | Градация 1 | Градация 2 | Σ |
| Градация 1 | a | b | a+b |
| Градация 2 | c | d | c+d |
| Σ | a+c | b+d | N=a+b+c+d |

В таблице 5 используются следующие обозначения:

- a – число случаев попадания прогностического и фактического значений в одну градацию;
- b – число случаев попадания прогностического значение и не попадания фактического значения в заданную градацию;
- c – число случаев попадания фактического значение и не попадания прогностического значения в заданную градацию;
- d – число случаев не попадания прогностического и фактического значений в одну градацию.

Градаций может быть не две, как показано в таблице 5, а больше.

Таблицу сопряженности можно представить одним индексом, называемый коэффициентом успешности прогнозов или индекс Heidke Skill Scores (HSS):

$$HSS = \frac{2(ad - bc)}{[(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)]} \quad (2)$$

Коэффициент успешности прогнозов равен единице, когда все прогнозы оправдались, и равен нулю, когда все прогнозы не оправдались. По этим критерием выбиралась лучшая комбинация параметризаций модели.

По средним значениям HSS (рисунок 1) для осадков лучшими являются комбинации 4 и 7, а худшими комбинации 1 и 2. Объяснить тот факт, что комбинация № 7 является лучшей, можно тем, что в ней используется схема параметризации микрофизических процессов WSM6, которая учитывает 6 типов гидрометеоров и схема параметризации конвекции Каина-Фритша ранее определенная лучшей схемой для прогноза осадков.

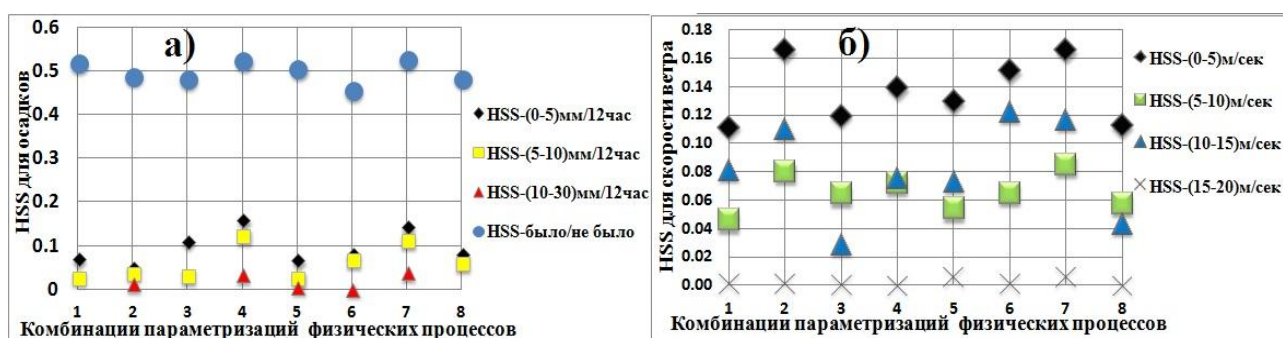


Рисунок 1 – Среднее значение HSS по градациям осадков (а) и скорости ветра (б) для каждой комбинации за период 01 по 30 апреля 2014 г.

Также для скорости ветра комбинация № 7 дает хороший результат, что связано с использованием схемы BL, основанной на замыкании КЭТ. Комбинации со схемами параметризации ППС QNSE и MYJ дают менее хороший результат, что, скорее всего, связано с тем, что в этих схемах для вычисления пути смещения (l) используется простая локальная диагностическая формула, полученная Блэкадаром для нейтральной стратификации над ровной подстилающей поверхностью:

$$l(z) = l_0 [kz / (kz + l_0)], \quad (3)$$

где k – константа Кармана (0,4);

l_0 – асимптотическое значение пути смещения на верхней границе пограничного слоя l_0 задается равным 200 м.

В верхней же части ППС часто существует слой инверсии, в котором турбулентные вихри должны разрушаться, и, следовательно, l стремится к своему минимальному значению. Формула Блэкадара дает максимальные значения для l на верхней границе ППС. Кроме того, в формуле (4) для диссипации КЭТ путь смещения l стоит в знаменателе и при применении формулы Блэкадара в верхней части ППС получается нефизическая картина.

$$\varepsilon = C_\varepsilon e^{\frac{3}{2}} / \ell, \quad (4)$$

где C_ε – эмпирический коэффициент.

Следуя формуле (4), в устойчивом слое l увеличивается, а диссипация падает, увеличивая КЭТ. Однако, с физической точки зрения, в устойчивом слое должно быть наоборот: l должен уменьшаться, а диссипация увеличиваться, уменьшая величину КЭТ. Другой случай, где формула Блэкадара дает нефизические результаты, является наличие конвекции. В ППС существуют вихри, размер которых больше шага модели по вертикали, например в условиях конвекции, а значит, формула для вычисления l должна быть нелокальной. А схема VL основана на методе описания смещения частиц воздуха, имеющих определенную КЭТ, с уровня z под действием силы плавучести. При таком подходе l зависит не только от стратификации в слое, где находится уровень z , но и от стратификации в других слоях, расположенных выше и ниже рассматриваемого слоя (нелокальный l). Это послужило поводом для модификации схем параметризации.

В конце главы делается вывод о том, что для моделирования атмосферных процессов на всей территории Киргизии лучшей комбинацией параметризаций физических процессов является конфигурация №7. Но ошибки моделирования скорости ветра и температуры в высокогорных районах все еще остаются большими и для их уменьшения исследовались параметризации ППС.

В четвертой главе описаны результаты исследований по повышению качества моделирования скорости ветра и температуры в высокогорных районах – проведены и проанализированы численные эксперименты с заблаговременностью 48 часов по исследованию чувствительности точности воспроизведения атмосферных процессов к описанию ППС. Исследования проводились на основе схемы параметризации пограничного слоя Бужо-Лакаре, которая показала наилучший результат в экспериментах, описанных в главе 3. Эта схема имеет 1.5 порядок и для замыкания используется прогностическое уравнение КЭТ:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho w' e'}}{\partial z} - \overline{u' w'} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{v' w'} \frac{\partial V}{\partial z} + \beta \overline{w' \theta'} - \varepsilon, \quad (5)$$

где

- e – кинетическая энергия турбулентности,
- U, V, W – составляющие скорости ветра,
- ρ – плотность воздуха,

$\beta=g/T$ – коэффициент плавучести,
 ε – диссипация КЭТ за счёт молекулярных процессов.
 Штрихом обозначены пульсации, а чертой сверху осреднение.

Моменты второго порядка параметризуются при помощи коэффициентов турбулентного обмена:

$$\overline{w'u'} = -K_m \frac{\partial U}{\partial Z}, \quad (6)$$

$$\overline{w'v'} = -K_m \frac{\partial V}{\partial Z}, \quad (7)$$

$$\overline{w'e'} = -K_e \frac{\partial e}{\partial Z}, \quad (8)$$

$$\overline{w'\theta'} = \begin{cases} -K_h \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} - \gamma_{cg} \right), \\ -K_h \frac{\partial \theta}{\partial Z}, \end{cases} \quad (9)$$

где

γ_{cg} – противогradientный член,
 K_m, K_e, K_h – коэффициенты турбулентного обмена импульса, КЭТ, тепла, соответственно.

Коэффициенты вертикальной диффузии рассчитываются через КЭТ с использованием следующих выражений:

$$K_m = C_k \ell e^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

$$K_h = \alpha_T K_m, \quad (11)$$

$$K_e = \alpha_e K_m, \quad (12)$$

где C_k – эмпирический коэффициент;
 ℓ – путь смешения;
 α_T и α_e – обратные турбулентные числа Прандтля.

Диссипация КЭТ рассчитывается по формуле (4).

При использовании этой схемы для параметризации орографически индуцированной турбулентности нужно найти определенные спецификации параметризации ППС над горной местностью. Поэтому исследовалась чувствительность качества прогноза основных метеорологических полей к

заданию пространственного масштаба ($C_k \ell$) и интенсивности перемешивания (C_ε/ℓ). Для этого рассматривалась чувствительность к эмпирическим коэффициентам C_k и C_ε , так как именно от описания пути смешения, как получено в экспериментах, описанных в главе 3, напрямую зависит корректность описание турбулентных вихрей, отвечающих за перестройки метеорологических полей. В работе Чов Ф.К., Де Векера Ф.Ж. и Снайдера Б.Ж. 2013 года отмечается необходимость уточнения эмпирических коэффициентов C_k , C_ε для территорий со сложной орографией. В исследованиях Бужо П. найдены характерные пространственные масштабы ППС для одиночной горы и холмистой местности, которые равны $C_k=0,4$ и $C_\varepsilon=1,4$. В данном исследовании рассматриваются реальные горные массивы. Исследование чувствительности проводилось прямым методом, то есть изучалось изменение основных метеорологических величин при варьировании коэффициентов турбулентности. Численные эксперименты проводились для следующих коэффициентов: $C_k=0,2$; $C_k=0,4$; $C_k=0,6$; $C_k=0,8$ при $C_\varepsilon=0,7$ и для эмпирических коэффициентов, используемых при расчете диссипации (12): $C_\varepsilon=0,1$; $C_\varepsilon=0,7$; $C_\varepsilon=1,3$ при $C_k=0,4$.

Анализ численных экспериментов показывает, что в зависимости от эмпирического коэффициента C_k ошибки прогноза температуры меняются лишь в определенном регионе, где рельеф в виде конуса открыт к северо-западным вторжениям и средняя квадратическая ошибка (σ) температуры составляет для $\sigma(C_k=0,2)=3,13^\circ\text{C}$, $\sigma(C_k=0,4)=2,34^\circ\text{C}$, $\sigma(C_k=0,6)=2,66^\circ\text{C}$, $\sigma(C_k=0,8)=2,21^\circ\text{C}$. В остальных регионах качество прогноза нечувствительно к значению эмпирического коэффициента C_k , а значит и к параметризации. Все станции региона, где наиболее значимо влияние эмпирического коэффициента C_k , на рисунке 2 отмечены треугольником, а крестиком помечены станции в

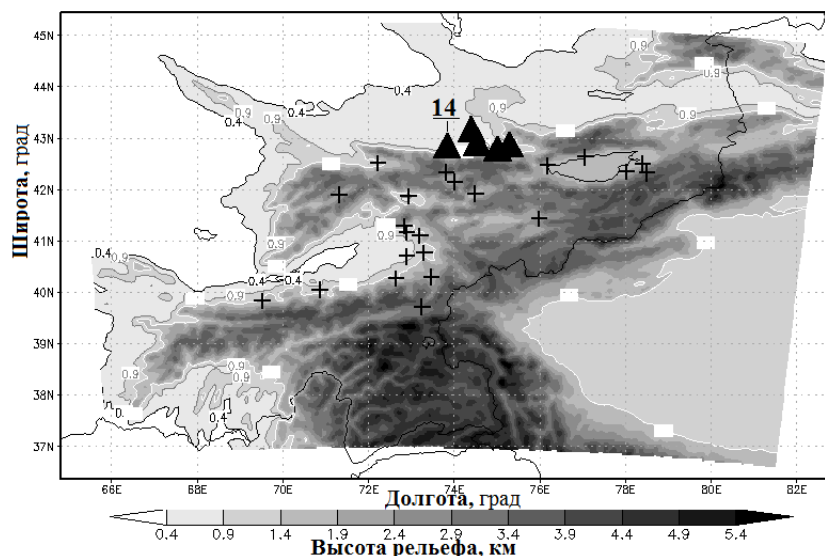


Рисунок 2 – Области чувствительности к параметризации ППС

области менее чувствительной к эмпирическому коэффициенту (C_k). Анализ результатов численных экспериментов для разных синоптических ситуаций выявил, что именно северные вторжения плохо прогнозируются и именно при таких вторжениях моделирование наиболее чувствительно к параметризации ППС. Пространственное распределение зон чувствительности к параметризации ППС объясняется связью метеорологических полей с направлением господствующего потока. Зона сильной чувствительности совпадает с регионом преобладания северного и северо-западного крупномасштабного переноса: поток встречается с высокими горами и происходит значительная трансформация воздушных масс в пограничном слое атмосферы. А все остальные регионы защищены от крупномасштабного воздействия горными хребтами. Зависимость от эмпирического коэффициента (C_ε), влияющего на диссипацию турбулентной энергии, аналогична.

Для более детального анализа рассмотрим одну станцию в регионе наибольшей чувствительности к C_k и C_ε – станция № 14 (рисунок 2). Средний суточный ход относительной ошибки прогноза температуры, рассчитанной по формуле (13), для станции № 14 приведён на рисунке 3.

$$\text{ОТН} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \frac{|X_{\text{п}} - X_{\text{ф}}|}{X_{\text{ф}}} \right) \times 100\%, \quad (13)$$

где N – количество прогнозов, участвующих в верификации; Анализ суточного хода ошибки показывает, что от 06:00 до 12:00 UTC наблюдается наибольшая ошибка прогноза температуры. Местное время отличается от гринвического на 6 часов, то есть максимальная ошибка наблюдается в интервале 12:00 - 18:00 часов местного времени, что соответствует максимальному развитию горно-долинной циркуляции.

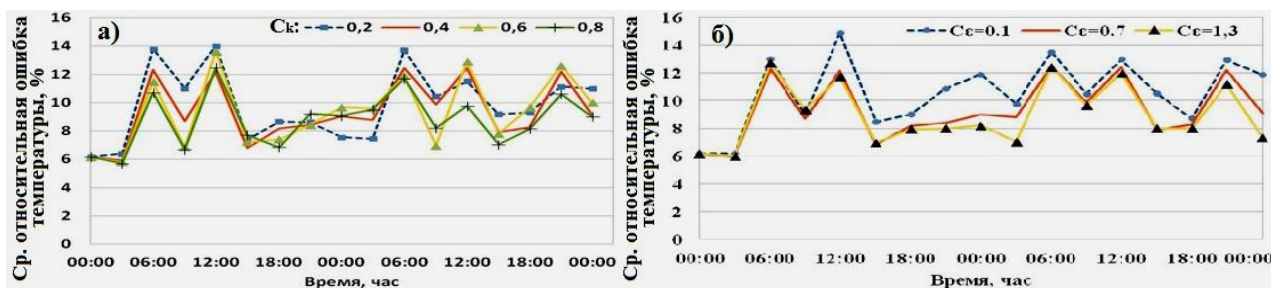


Рисунок 3 – Суточный ход средней относительной ошибки прогноза температуры (а) – $C_k=(0,2;0,4;0,6;0,8)$, $C_\varepsilon=0,7$; (б) – $C_\varepsilon=(0,1;0,7;1,3)$ $C_k=0,4$

На рисунке 4 представлены результаты прогноза в ситуации, когда ветер меняет направление на противоположное – из долины вверх.

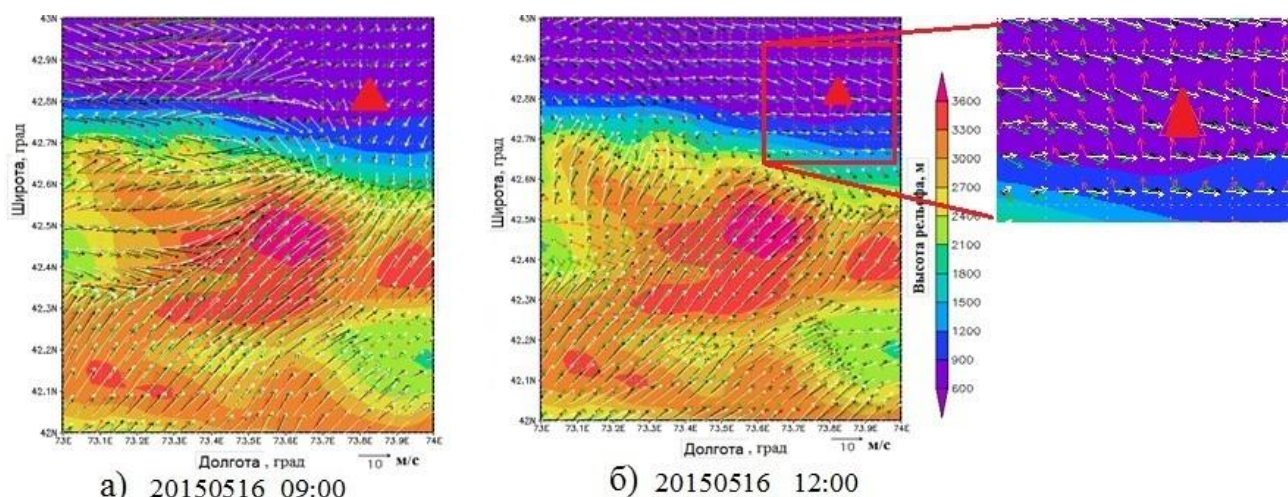


Рисунок 4 – Вектор ветра в зависимости от эмпирического коэффициента. Стрелки разного цвета соответствуют разному значению коэффициента: черный ($C_k = 0,4$), красный ($C_k = 0,2$), зеленый ($C_k = 0,6$), белый ($C_k = 0,8$)

В 09:00 UTC (рисунок 4а) «сталкиваются» крупномасштабные и местные потоки, крупномасштабный поток перпендикулярен горно-долинному, что очень ярко проявляется при моделировании с 15.05.2015 00:00 по 17.05.2015 00:00, когда отмечаются максимальные ошибки прогноза температуры (4 -5 C^0) и скорости ветра (4 -5 м/сек). Красным треугольником отмечена станция № 14. В 00:00 UTC (по местному времени 06:00) горно-долинный ветер направлен с гор в долину. Ближе к полудню склоны гор нагреваются быстрее, чем подстилающая поверхность долины, вследствие чего скорость и направление местного потока начинают меняться. В 12:00 часов (рисунок 4б) крупномасштабный поток ослабел и наблюдается ветер разных направлений и скорости в зависимости от эмпирического коэффициента C_k , ответственного за коэффициент турбулентности. При $C_k=0,2$ (выделено красным цветом) приземный ветер направлен с гор в сторону долины, а при $C_k=0,8$ (выделено белым цветом) ветер, поменяв направление, совпал с направлением крупномасштабного потока. Соответственно, абсолютная ошибка в прогнозе скорости ветра при $C_k=0,2$ составила 2 м/с, а при $C_k=0,8$ – 0,8 м/с. Это связано с тем, что при увеличении C_k увеличиваются путь смещения и коэффициент турбулентного обмена, что позволяет лучше описать перестройки метеорологических полей под влиянием взаимодействия натекающего крупномасштабного потока и местной циркуляции.

Для регионов, наиболее подверженных воздействию со стороны крупномасштабных потоков (рисунок 5), использование модифицированной параметризации ППС дает наилучший результат при моделировании, что объясняется лучшим описанием пути смещения и диссипации турбулентных вихрей.

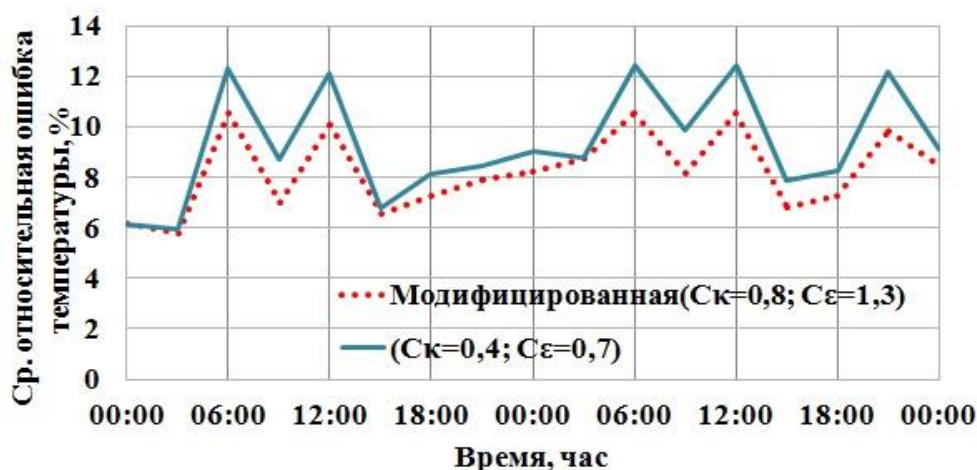


Рисунок 5 – Суточный ход средней относительной ошибки прогноза температуры для и старой схемы (сплошная синяя линия) и модифицированной (красный пунктир) схемы ППС

Далее были проведены эксперименты с использованием модифицированной схемы ППС на сетках с более высокими пространственными разрешениями. При моделировании с пространственным разрешением 1,25 км на 5 шаге интегрирования (24 секунда) возникла вычислительная неустойчивость, что привело к нереальному росту скорости ветра. Вычислительная неустойчивость возникла в высокогорном регионе, где горные хребты достигают высот 4-6 км и имеют крутые склоны. Моделируемая горизонтальная скорость ветра в этом регионе достигла 120 м/с, а вертикальная составляющая скорости ветра 1800 м/с. Для борьбы с вычислительной неустойчивостью использовали дополнительное демпфирование акустических мод.

Из анализа результатов численных экспериментов видно улучшение качества моделирования метеорологических полей с увеличением пространственного разрешения модели, но стоит отметить, что время расчёта увеличилось. Прогноз с заблаговременностью 48 часов занял:

- для пространственного разрешения 5 км — 6 часов;
- для пространственного разрешения 2,5 км — 46 часов;
- для пространственного разрешения 1,25 км — 336 часов.

Переход на более мелкие сетки улучшает качество моделирования атмосферных процессов, но при существующих вычислительных ресурсах использование пространственного разрешения 5 км является оптимальным для моделирования атмосферных процессов на территории Киргизии.

В пятой главе описано исследование влияния усвоения данных наблюдений на качество моделирования атмосферных процессов в регионе со сложным рельефом.

Численные эксперименты проводились с заблаговременностью 48 часов с

использованием трехмерной вариационной схемы (3dVar). В экспериментах по усвоению с использованием вариационной схемы (WRF_DA) использовалась следующая информация: приземное давление, температура воздуха на высоте 2 м, зональная и меридиональная составляющие скорости ветра на высоте 10 м, температура точки росы. Данные получены по результатам наблюдений по 31 метеорологической станции, не входящих в международный обмен. В международном обмене участвуют данные только семи метеорологических станций исследуемого региона. Все метеорологические поля получены из данных реанализа NCEP.

Ковариационная матрица ошибок рассчитана на основе прогнозов модели GFS (Global Forecasting System).

В таблице 6 приведены результаты сопоставления моделирования с ассимиляцией и без ассимиляции отдельно для станций, расположенных в долинах (№ 13, 14) и в горах (№ 22, 30). Под средним значением, принимается осредненное значение исследуемой метеорологической величины по 16 значениям за 2 суток (каждые 3 часа) прогностического периода. Оценивались следующие ошибки:

$$\text{средняя абсолютная ошибка} \quad \delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{\text{п}} - X_{\text{ф}}|, \quad (14)$$

$$\text{средняя систематическая ошибка} \quad \varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{п}} - X_{\text{ф}}), \quad (15)$$

$$\text{средняя квадратическая ошибка} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{п}} - X_{\text{ф}})^2}, \quad (16)$$

где $X_{\text{п}}$ – прогностические метеорологические поля;
 $X_{\text{ф}}$ – фактические метеорологические поля;
 N – количество прогнозов, участвующих в верификации.

Таблица 6 – Ошибки прогнозов с ассимиляцией и без ассимиляции

| Оцениваемая величина $X_{\text{ф}}$ | № станции | Среднее значение $X_{\text{ф}}$ | Средняя абсолютная ошибка (δ) | | Среднеквадратическая ошибка (σ) | | Средняя систематическая ошибка (ε) | |
|-------------------------------------|-----------|---------------------------------|----------------------------------------|-------|------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------|-------|
| | | | Без | 3dVar | Без | 3dVar | Без | 3dVar |
| Температура, С | 13 | 18,8 | 1,7 | 1,1 | 2,2 | 2,0 | 0,6 | 0,4 |
| | 14 | 18,5 | 2,2 | 1,5 | 2,7 | 2,0 | 1,6 | -0,1 |
| | 22 | 17,3 | 2,4 | 2,3 | 3,1 | 3,0 | 1,3 | 1,1 |
| | 30 | 12,9 | 2,4 | 2,3 | 3,3 | 3,2 | -1,8 | -1,1 |
| Давление, гПа | 13 | 944,83 | 2,90 | 1,31 | 1,24 | 1,23 | 1,18 | -1,00 |
| | 14 | 924,55 | 2,18 | 1,24 | 2,33 | 1,48 | 2,10 | 0,96 |
| | 22 | 915,72 | 2,09 | 1,32 | 2,31 | 1,66 | 1,97 | 0,80 |
| | 30 | 798,81 | 1,90 | 1,21 | 1,18 | 1,15 | -1,19 | -0,89 |
| Скорость ветра, м/сек | 13 | 2,4 | 2,3 | 2,3 | 2,8 | 2,7 | 1,7 | 1,6 |
| | 14 | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 2,1 | 2,1 | 1,3 | 1,1 |
| | 22 | 0,8 | 4,0 | 4,0 | 6,5 | 6,5 | 2,9 | 2,9 |
| | 30 | 2,1 | 2,2 | 2,4 | 4,7 | 4,6 | 0,9 | 1,2 |

Анализ таблицы 6, позволяет сделать однозначный вывод о том, что результаты численного моделирования заметно лучше в тех случаях, когда модель запускалась с применением ассимиляции данных. А также можно заметить относительно большие средние ошибки по температуре и скорости ветра на некоторых станциях (под номерами 22, 30). Это объясняется тем, что все эти станции расположены в регионе с очень сложной орографией – модельный узел и станция расположены с разных сторон горных массивов с разными ветровыми режимами и затененности, от которой зависит попадание солнечных лучей. Путем решения этой проблемы является увеличение горных метеорологических станций в этом регионе.

В ходе исследования обнаружено, что в целом для территории Киргизии разность между прогнозами с ассимиляцией и без ассимиляции довольно быстро исчезает со временем – после 24 часов моделирования. Разность прогноза температуры с использованием ассимиляции и без ассимиляции при заблаговременности прогноза 24 часа достигает 4°C , давления 5гПа, а после 24 часов моделирования – 2°C и 2гПа, соответственно. Для улучшения качества прогноза на промежутках времени более 24 часов требуется усвоения большей информации, например, результатов спутникового зондирования.

В заключение сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

1. Разработана методология краткосрочного прогноза погоды над территорией со сложной орографией. Показана важность выбора оптимальной комбинации схем параметризации физических процессов и особая значимость параметризаций конвекции, микрофизики облаков, ППС, что обуславливается влиянием мезомасштабных вертикальных токов и неравномерности нагрева на атмосферные процессы. При современных возможностях Гидрометслужбы Киргизии оптимальным является разрешение модели по горизонтали 5 км. Разработанная система гидродинамического моделирования, внедрённая в оперативную работу КыргызГидромета, позволила увеличить качество прогнозов примерно на 5%.
2. В результате исследования чувствительности моделирования атмосферных процессов на территории со сложной орографией к выбору комплекса параметризаций физических процессов получено, что наибольшая чувствительность связана с выбором схем параметризации ППС. В регионе со сложным рельефом локальные характеристики атмосферы в ППС меняются значительным образом и для корректного их описания предпочтительнее использование схем параметризации ППС на основе решения уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций не ниже 1.5 порядка замыкания.

3. Предложена, реализована и протестирована модифицированная схема параметризации ППС. Показано, что в регионах со сложной орографией оптимальным является параметризация ППС на основе схемы Бужо-Лакаре (решается уравнение для КЭТ, имеет 1.5 порядок). Показано, что для повышения качества описания процессов в ППС на территории со сложной орографией решающим является определение пути смещения. Предложен и реализован метод определения чувствительности качества прогноза к пути смещения и на основе этого получены оптимальные параметры схемы. Показано улучшение качества прогноза метеорологических величин при использовании модифицированной схемой параметризации ППС, особенно в районе, где рельеф открыт влиянию крупномасштабных потоков.
4. Показано, что взаимодействие крупномасштабного потока с местными циркуляциями наиболее сильно проявляется в регионах первичного столкновения потока с горным массивом. Во внутренних областях горной системы влияние крупномасштабного потока незначительно. Для территории Киргизии особое влияние оказывают северные арктические вторжения.
5. Разработан и реализован в форме программного модуля комплекс для верификации гидродинамического прогноза метеорологических величин на территории со сложной орографией. Показано, как при верификации прогнозов метеорологических полей необходимо учитывать разность высот модельного узла и метеорологической станции, а также выбирать станции для оценки качества моделирования на основе предварительного корреляционного анализа.
6. Реализован комплекс усвоения данных наблюдений наземных метеорологических горных станций, не входящих в международный обмен, в гидродинамическую модель. Показано, что наибольшее влияние ассимиляция оказывает на качество прогноза давления (уменьшение среднеквадратической ошибки на некоторых станциях на 50%). Показано, что усвоение данных метеорологических станций позволяет уменьшить ошибки прогноза метеорологических полей с заблаговременностью 24 ч.

В рамках данной работы была создана комплексная технология краткосрочных прогнозов погоды для Киргизии – региона со сложной орографией – на основе мезомасштабной модели WRF-ARW. При создании данной технологии максимально использовались программно-аппаратные средства, прошедшие апробацию в оперативной работе Агентства по гидрометеорологии при Министерстве чрезвычайных ситуаций Киргизской Республики (Кыргызгидромет). Информационная продукция, создаваемая по данной технологии, используется в настоящее время специалистами Кыргызгидромета при подготовке прогноза погоды по региону. С внедрением разработанной системы гидродинамического моделирования атмосферных

процессов в оперативную практику Кыргызгидромета оправдываемость прогнозов температуры, скорости и направления ветра, количество осадков, давления с 2015 по 2017 годы выросло для прогнозов на сутки с 89% до 94 %, на 3 суток с 87% до 92%. А также позволила давать более точные прогнозы в трудно доступных регионах горной местности.

Публикации соискателя по теме диссертации.

В изданиях из перечня ВАК:

Опубликованные:

1. Исаев, Э.К. Гидродинамическое моделирование атмосферных процессов в Кыргызстане / Э.К. Исаев // Вестник КРСУ. –2014. –Том 14, №7. – С. 49-53.

2. Исаев, Э.К. Влияние схем параметризации микрофизических процессов на качество прогноза атмосферных процессов в районе со сложным рельефом на примере территории Кыргызстана/Э.К. Исаев, О.Г. Анискина//Ученые записки РГГМУ.–2015.–Вып.38.–С.118–125.

3. Исаев, Э.К. Оценка влияния параметризаций физических процессов в гидродинамической модели WRF на качество прогноза атмосферных процессов в районе со сложным рельефом на примере территории Киргизии/Э.К. Исаев, С.В. Мостаманди, О.Г. Анискина // Ученые записки РГГМУ.–2015.–№.40.– С.30–41.

4. Исаев, Э.К. Оценка влияния параметризаций планетарного пограничного слоя в гидродинамической модели WRF на качество прогноза атмосферных процессов в районе со сложным рельефом/Э.К. Исаев, О.Г. Анискина, С.В. Мостаманди//Труды ГГО.–2017. –№.584.–С.123–141.

Другие публикации за период написания диссертации:

Исаев Э.К., Анискина О.Г., Оценка влияния схем параметризаций физических процессов на качество гидродинамического прогноза погоды в районе со сложным рельефом // VII Открытой международной молодежной научно-практической конференции «Молодая наука – 2016», посвященной 70-летию основания Краснодарского регионального отделения Русского географического общества и 20-летию основания Филиала РГГМУ –Туапсе.– 2017. –С.264-267.