



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Разработка гидродинамического прогноза температуры и осадков
для Крыма»

Исполнитель Болтвин Анастасия Александровна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой 
(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«_20_»_мая_____2021 г.

Санкт-Петербург
2021

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Гидродинамические модели атмосферы.....	8
1.1 Общая характеристика	8
1.2 Динамическая часть модели атмосферы.....	9
1.3 Физическая часть гидродинамической модели атмосферы.....	10
2 Методы численного прогноза метеорологических величин	12
2.1 Численные методы	12
2.2 Полулагранжева адвекция.....	12
2.3 Сетки на сфере.....	13
2.4 Схемы интегрирования по времени	14
3 База данных о прогностических и фактических значениях метеорологических величин по выбранному пункту	15
3.1 Физико-географическая характеристика исследуемого района.....	15
3.2 Климат г. Севастополя.....	16
3.3 База данных температуры воздуха и осадков в городе Севастополе	18
4 Разработка гидродинамического прогноза для г.Севастополя.....	22
4.1 Используемая модель и её характеристики.....	22
4.2 Данные, используемые в исследовании.....	24
4.3 Верификация прогностических полей по данным анализа GFS	29
4.3.1 Влияние параметризации физических процессов на качество моделирования.....	32
4.4 Верификация по данным наблюдений на метеорологической станции.....	38

4.5 Параметризации, применяемые в модели.....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	51
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	53
ПРИЛОЖЕНИЕ А	55
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ В	61

СОКРАЩЕНИЯ

км – километр

м – метр

с. ш. – северная широта

в.д. – восточная долгота

мм/в год – миллиметр в год

WRF-ARW – модель WRF (Weather Research and Forecasting) с динамическим ядром ARW (Advanced Research WRF)

UTC - Coordinated Universal Time (Всемирное координированное время)

GFS – Global Forecast System

°C – градус Цельсия

м/с – метр в секунду

кг/кг – килограмм на килограмм

ВВЕДЕНИЕ

Гидродинамический краткосрочный прогноз погоды сочетает в себе достижения геофизической гидродинамики, вычислительной математики и эффективного учета всех физических процессов в атмосфере.

Современные прогнозы погоды и климата основаны на численном решении уравнений гидродинамики атмосферы. Этот прогноз основан на результатах гидродинамического моделирования с использованием численных моделей атмосферы различного пространственно-временного масштаба.

В настоящее время существуют, как минимум, три типа моделей, описывающих формирование погоды и климата с разными пространственными масштабами:

1) глобальные, которые используются в крупнейших метеорологических центрах для прогнозирования крупномасштабных процессов и формирования динамических граничных условий для региональных прогнозов;

2) региональные, с шагом около 3-10 км, предназначены для детального описания развития синоптических процессов над регионами, обслуживаемыми большинством метеорологических центров;

3) мелкомасштабные, которые имеют шаг от 100 до 500 м, и служат для подробного изучения процессов, формирующих погодные условия приземного и пограничного слоев.

Во всех гидродинамических моделях атмосферы существуют ошибки. Это погрешности исходных данных, ошибки, связанные с постановкой граничных условий, ошибки, связанные с выбором пространственного и временного разрешения модели, погрешности, связанные с выбором схемы параметризации физических процессов в масштабе сетки. Все эти ошибки существенно влияют на качество моделирования.

Этим объясняется актуальность данной работы, посвященной адаптации мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW, для снижения

ошибок прогноза приземной температуры и количества осадков с помощью изменения параметризации.

Целью данной работы является разработка гидродинамического прогноза температуры и количества осадков с использованием модели WRF-ARW на территории г. Севастополя.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить модель WRF-ARW и освоить работу с ней, провести численные эксперименты;
2. Изучить пакет GRADS для визуализации результатов моделирования;
3. Адаптировать данную модель к региону исследования
4. Разработать прогноз метеорологических величин в период с 01.10.2020 по 01.11.2020 года;
5. Создать архив данных о количестве осадков и о приземной температуре воздуха в г.Севастополь;
6. Произвести оценку качества моделирования.
7. Выполнить анализ полученных данных;

Объектом исследования являются прогноз температуры воздуха и осадков.

Предметом исследования является гидродинамический прогноз с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW.

В качестве изучаемой местности было принято решение выбрать республику Крым, а именно г. Севастополь, поскольку прогноз осадков является очень важной задачей для обеспечения жизнедеятельности.

Выпускная квалификационная работа состоит из 4 глав.

В первой главе представлена основная информация о гидродинамических моделях атмосферы. Рассматривается их общая характеристика, динамическая и физическая части модели атмосферы.

Во второй главе рассматриваются методы численного прогноза метеорологических величин.

В третьей главе данной работы представлена информация о физико-географической характеристике исследуемого района, а также описана собранная база данных о прогностических и фактических значениях метеорологических величин по выбранному пункту.

В четвёртой главе описана адаптация модели к выбранному региону, описаны численные эксперименты, результаты верификации прогнозов.

В заключении приведены выводы по проведённому исследованию.

Методической основой работы послужили литературные источники, интернет ресурсы, справочные материалы и методические указания.

1 Гидродинамические модели атмосферы

1.1 Общая характеристика

Впервые подход к решению проблемы гидродинамического прогноза был предложен в СССР И. А. Кибелем в 1940 году. Но быстро и точно использовать гидродинамические модели стало возможным только после появления электронно-вычислительных машин.

В 1946 г. стала применяться одна из простейших простых моделей – это однослойная (баротропная) модель. С этой моделью были проведены различные эксперименты, которые дали хорошие результаты. Но что было плохо в модели, так это то, что она не могла предсказать образование новых циклонов, связанных с резкой сменой погоды.

Все модели различаются своими характеристиками, применяемыми численными процедурами и выходными параметрами. Также в зависимости от горизонтальных размеров области прогноза, они делятся на глобальные, полусферные, региональные и модели по ограниченной территории (или мезомасштабные). Модели также имеют неодинаковое разрешение по высоте и различаются видом численного интегрирования. Поля метеорологических значений для прогноза рассчитываются в точках регулярной сетки или же используется спектральное представление некоторых данных.

Каждая из разработанных моделей состоит из двух частей: динамической и физической. Динамическая часть включает решение уравнений, а физическая – описание самих процессов, которые не могут быть отображены математически.

Для решения систем математических уравнений в гидродинамическом моделировании, требуются мощные компьютеры, с большим объемом памяти и скорости [1].

1.2 Динамическая часть модели атмосферы

Для определения поведения атмосферы используется система уравнений, которая, в свою очередь, является сложной и нелинейной. Для расчета прогноза необходимо решить следующие уравнения:

- состояния сухого воздуха, определяющего соотношение между температурой, плотностью и давлением воздуха;
- горизонтального движения воздуха, определяющего характер изменения ветра в зависимости от силы трения, силы Кориолиса и градиента давления;
- гидростатики, которая описывает взаимосвязь между изменением давления с высотой и плотностью воздуха. Сегодня используют негидростатические модели, в которых это уравнение не используется для описания акустических волн;
- термодинамики, определяющее турбулентный обмен, изменение температуры и нагрев солнечным излучением;
- неразрывности для влажного и сухого воздуха.

Обычно используют, приближенный численный метод конечных разностей по времени и пространству, поскольку отсутствуют общепринятые аналитические методы решения нелинейной системы уравнений гидродинамики атмосферы.

Модель вычисляет тенденцию прогнозируемых значений на основе текущего состояния атмосферы. Прогнозируемые значения величин вычисляются через короткий промежуток времени, например, через 10 минут – через временной интервал, называемый шагом по времени. Полученные значения используются для следующего расчета, и устанавливается такой же интервал времени. И так повторяется до тех пор, пока не будут получены значения всех прогнозируемых величин на весь срок прогноза. При больших шагах по времени появляется неустойчивость в расчетах. Следовательно, шаг по времени должен быть меньше, чем время перемещения воздуха от одной точки расчета к другой [1].

1.3 Физическая часть гидродинамической модели атмосферы

Модели атмосферы должны правильно воспроизводить давно существующие крупномасштабные процессы. Однако маломасштабные физические процессы также важны. Но учет таких процессов, масштаб которых меньше шага сетки, существенно усложняет расчеты. Такие процессы учитываются с помощью параметризации. Это означает, что значения величины мелкомасштабных процессов используются только в точках сетки, где известны значения, и оценивается влияние этих процессов на значения сетки прогнозируемых метеорологических величин.

Новые современные численные модели включают в себя параметризацию таких процессов.

1. Планетарный пограничный слой. Это нижний слой атмосферы (1 – 1,5 км), играющий важную роль в системе атмосфера – Земля. Параметры пограничного слоя учитываются на основании значений температуры, ветра и влажности воздуха, предполагая, что турбулентный перенос тепла, количества движения и влаги происходит пропорционально их градиентам.

2. Такие характеристики, как снежный покров, растительность, морской лед, отражательная способность и шероховатость поверхности оказывают значительное влияние на потоки влаги и тепла. Для определения параметров этих характеристик используются значения температуры и влажности почвы, а также плотности снежного покрова.

3. Орфография. Деформация воздушного потока вызвана рельефом земной поверхности, в частности горными препятствиями. При прогнозировании осреднение высоты рельефа может привести к большим ошибкам. Сегодня в моделях учитывается рельеф с разрешением 1 км и меньше.

4. Температура поверхности моря. Анализ температуры поверхности моря основан на измерениях, полученных с помощью спутниковых наблюдений и морских судов. В холодное время года наблюдаются резкие

перепады температуры в некоторых частях Мирового океана, и из-за этого анализ получается достаточно не точный. Следует вводить новые данные, как только это потребуется.

5. Конвекция. Тепло и влага передаются в атмосферу от поверхности Земли. Это происходит при конвективных процессах. Для определения параметров конвективных движений используется характеристика устойчивости воздуха в каждой точке сетки.

6. Облачность. Важно учитывать влияние облачности на радиационный процесс. Радиационные характеристики облачности зависят от типа облаков и их количества. Параметры облачности определяются с помощью эмпирических соотношений [1].

2 Методы численного прогноза метеорологических величин

Рассмотрим характерные методы аппроксимации по времени и пространству, которые применяются в блоках решения динамических уравнений в моделях атмосферы. Система трехмерных уравнений представляет собой осредненные уравнения Навье-Стокса (уравнение Рейнольдса) на вращающейся сфере с уравнением переноса водяного пара [2].

2.1 Численные методы

Сегодня в численных моделях прогнозирования погоды используются конечно-разностные методы аппроксимации и спектральные методы.

Преимуществами конечно-разностных методов являются их локальность и линейность арифметических операций. В свою очередь, спектральный метод также имеет свои достоинства, такие как однородность разрешения и тривиальность решения эллиптических уравнений на сфере, а также отсутствие фазовой ошибки и нелинейной неустойчивости. Основным недостатком спектрального метода является его нелокальность.

Появились исследования по использованию новых численных методов для дискретизации в горизонтальной плоскости в моделировании атмосферы. Такими методами являются, например, метод спектральных элементов, метод конечных элементов на икосаэдральной сетках (рисунок 2.1). В общих деталях, в модели реализован новый блок решения уравнений динамики атмосферы, основанный на методе спектральных элементов [2].

2.2 Полулагранжева адвекция

Сеточный полулагранжев метод использует большинство региональных и глобальных моделей для описания адвекции. Это, в свою очередь, устраняет ограничение величины шага по времени условием Куранта. Увеличение шага

по времени позволяет при определенном разрешении модели ускорить время расчёта прогноза. Такое увеличение не нарушает аппроксимации, поскольку ограничение по числу Куранта возникает при расчете струйных течений в тропосфере. Этот метод может дать значительно меньшую фазовую ошибку, чем конечно-разностный метод.

Кроме этого, благодаря использованию больших шагов по времени, полулагранжев метод позволяет вычислять перенос значительного количества составляющих атмосферы быстрее, чем другие численные методы [2].

2.3 Сетки на сфере

Широтно-долготные сетки применяются в моделях глобальной атмосферы и океана. Проблемой данного метода является неоднородность таких сеток – разрешение таких сеток различно на разных широтах, в большей степени эта проблема проявляется на полюсах. Этот недостаток приводит к не лучшим свойствам конечно-разностной аппроксимации вблизи полюсов и большому ограничению на число Куранта в моделях Эйлера [2]. На рисунке 2.1 приведены различные сетки, которые используются в глобальных моделях атмосферы.

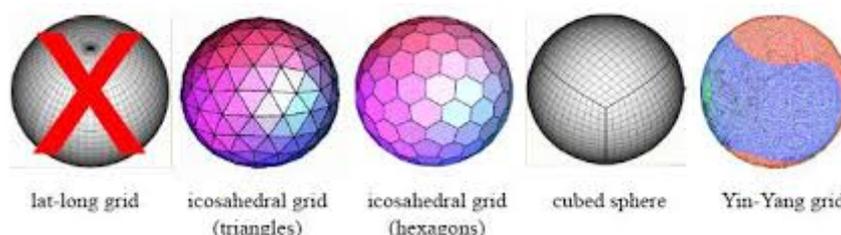


Рисунок 2.1 – Различные сетки, используемые в глобальных моделях атмосферы: широтно-долготная сетка, икосаэдральная сетка на основе треугольников, икосаэдральная сетка на основе шестиугольников, кубическая сфера, сетка Инь-Янь [2]

2.4 Схемы интегрирования по времени

Полунеявный метод представляет собой интегрирование линейных слагаемых по неявной схеме, а нелинейных слагаемых по явной схеме. Данный метод используется практически во всех гидродинамических моделях атмосферы. В негидростатических моделях атмосферы применяются явно-неявные методы интегрирования по времени: неявное интегрирование уравнений, соответствующих процессам вертикальной адвекции, а интегрирование по явной схеме – по горизонтали. Шаг по времени в этом методе определяется частотой самого быстрого волнового процесса в системе, интегрируемого по явной схеме [2].

3 База данных о прогностических и фактических значениях метеорологических величин по выбранному пункту

3.1 Физико-географическая характеристика исследуемого района

В данном исследовании будет рассматриваться гидродинамический прогноз температуры и осадков для г. Севастополя.

Севастополь – город федерального значения Российской Федерации, субъект Российской Федерации. Город Севастополь расположен в юго-западной части Крыма на Гераклейском полуострове [3]. Город находится в пределах между $44^{\circ} 35'$ с. ш. $33^{\circ} 31'$ в.д. (рисунок 3.1).

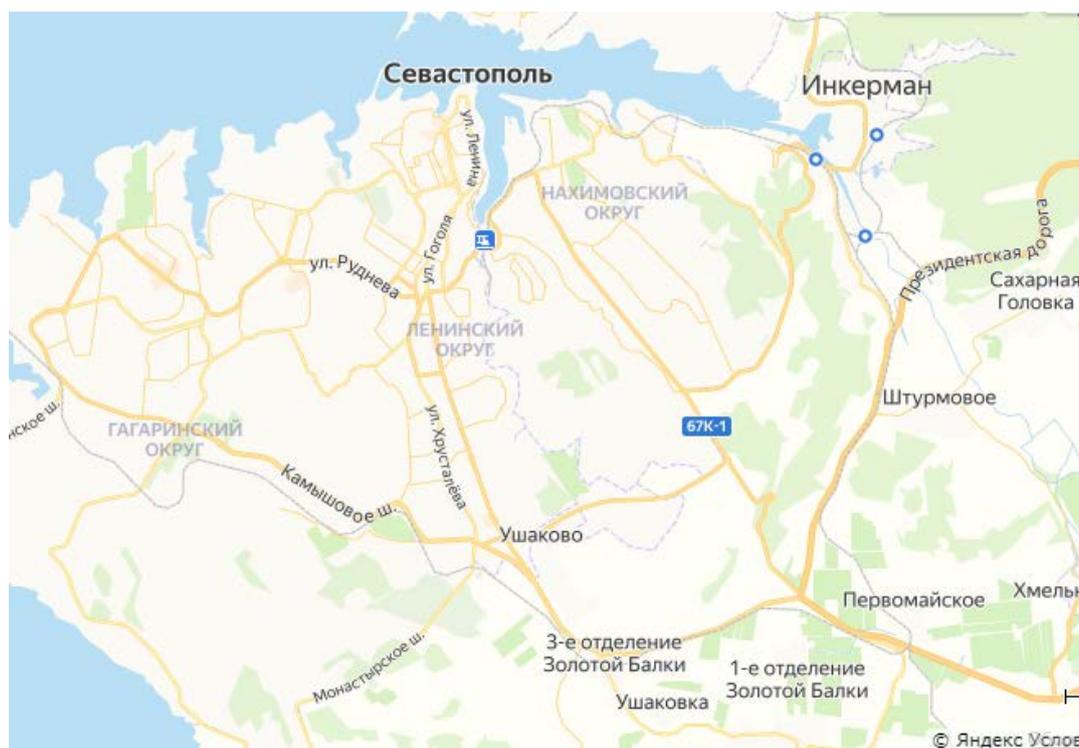


Рисунок 3.1 – Карта города Севастополя [4]

Территория Севастопольского горсовета граничит с административными единицами Автономной Республики Крым — на северо-востоке с Бахчисарайским районом, а на юго-востоке — с территорией Ялтинского городского совета; общая длина сухопутных границ составляет 106 км [3].

На западе и юге территория, подчинённая Севастопольскому горсовету, ограничена береговой линией Чёрного моря, общая протяжённость которой составляет 152 км. Крайними точками являются:

на севере — мыс Лукулл,

на юге — мыс Сарыч,

на западе — мыс Херсонес,

на востоке — гора Тез-Баир на Ай-Петринской яйле [3].

3.2 Климат г. Севастополя

Рельеф как климатообразующий фактор оказывает большое влияние на климат. Воздушные массы задерживаются горными хребтами. В горных понижениях и долинах происходит своя циркуляция - горно-долинные ветры, а разная экспозиция (ориентация по сторонам горизонта) склонов способствует увеличению облачности и осадков. Теплые и легкие воздушные массы, приходящие с юга, беспрепятственно проникают в низкие Крымские горы, принося теплую погоду в предгорья и степи. Холодный, тяжелый воздух из Арктики не может преодолеть препятствие в виде Крымских гор. Таким образом, горы для южного побережья играют защитную роль и с учетом широты и влияния моря, климатический тип региона можно определить, как морской умеренно континентальный в предгорьях и умеренно континентальный с особенностями субтропического средиземноморского типа на юго-восточном побережье Севастополя [5].

Температура воздуха. Среднемесячные температуры воздуха в течение года все положительные. В предгорьях они изменяются с севера на юг, а на юго-западном побережье - с юго-запада на северо-восток. Самый холодный - февраль (+2,6° С), самый теплый - июль (+22,4° С). Долины и котловины (Байдарская, Балаклавская, Инкерман) имеют самые высокие суточные амплитуды температуры воздуха. Примерно 238 безморозных дней в году.

Относительная влажность. В зимние месяцы она колеблется от 60% в предгорьях до 75% в горах, летом от 42% в предгорьях до 55% в горах и на морском побережье.

Атмосферные осадки. Из-за сложного строения рельефа они распределены неравномерно: от 300 мм/год на западном побережье до 700 мм/год на Ай-Петринской яйле, 800-1000 мм/год в районе Главного хребта, около 450 мм/год в предгорьях. Таким образом, для западного побережья характерно недостаточные увлажнение (для нормального роста растений необходимо количество осадков не менее 500 мм/год). В Балаклавской и Байдарской долинах выпадает 400-500 мм/год, на остальной же территории около 300 мм/год. Общее количество осадков составляет около 480-500 тыс.куб.м/год. Летом дожди идут очень редко (5-6 дней в месяц), к примеру, среднемесячное количество осадков в июле - 26 мм. Это самый сухой месяц для Севастополя. Самым дождливый - декабрь, где среднемесячное количество осадков составляет 42 мм. Снег зимой выпадает почти каждый год, но устойчивый снежный покров только на вершинах гор, где продолжительность его залегания длится 70-90 дней. Высота снежного покрова колеблется от 3-4 см на побережье до 10-20 см в предгорьях и 20-40 см в горах.

Ветер. Зимой преобладают северо-восточные ветры, приносящие холодный арктический воздух. В отдельные годы, в январе и феврале, скорость ветра достигает 15 м/с. Летом преобладают западные и северо-западные ветры. В межсезонье - южные. Самый ветреный месяц для Севастополя - ноябрь.

При изменении высоты меняется вся температура воздуха, атмосферное давление и другие показатели. Например, в горном Крыму при подъеме на каждые 100 м высоты температура воздуха горы снижается на $0,65^{\circ}$ С. Изменение этого и других показателей приводит к формированию особого горного климата [5].

3.3 База данных температуры воздуха и осадков в городе Севастополе

В таблице 3.1 и 3.2 представлены исходные данные температуры воздуха и осадков соответственно, начиная с 6 мая 2020 года.

Таблица 3.1 – Исходные данные о температуре воздуха

ДАТА	t в дневной срок, °С	t в ночной срок, °С
6.05.2020	18,0	10,0
7.05	16,0	10,0
8.05	15,0	10,0
9.05	16,0	10,0
10.05	19,0	10,0
11.05	20,0	11,0
12.05	23,0	12,0
13.05	17,0	10,0
14.05	20,0	9,0
15.05	25,0	14,0
16.05	22,0	14,0
17.05	20,0	13,0
18.05	22,0	13,0
19.05	21,0	13,0
20.05	19,0	13,0
21.05	16,0	12,0
22.05	17,0	11,0
23.05	15,0	9,0
24.05	18,0	9,0
25.05	17,0	10,0

Продолжение таблицы 3.1

26.05	18,0	11,0
27.05	19,0	11,0
28.05	18,0	14,0
29.05	20,0	13,0
30.05	20,0	13,0
31.05	21,0	14,0
01.06	19,0	14,0
02.06	18,0	12,0
03.06	17,0	13,0
04.06	19,0	12,0
05.06	21,0	14,0
06.06	23,0	17,0
07.06	23,0	15,0

Таблица 3.2 – Исходные данные о количестве осадков

ДАТА	Количество осадков в дневной срок, мм	Количество осадков в ночной срок, мм
6.05.2020	0,2	0,2
7.05	1,4	0,2
8.05	0,3	1,0
9.05	0,2	0,7
10.05	0,0	0,4
11.05	0,0	0,0
12.05	0,1	0,0
13.05	0,0	0,0
14.05	0,1	0,0
15.05	0,2	0,7
16.05	0,1	1,0
17.05	0,0	0,0
18.05	0,1	0,0
19.05	0,0	0,0
20.05	0,2	0,0
21.05	1,1	2,8
22.05	0,1	0,0
23.05	0,1	2,2
24.05	0,0	0,2
25.05	0,2	0,1
26.05	0,4	2,5
27.05	0,0	0,0
28.05	14,5	10,6

Продолжение таблицы 3.2

29.05	0,0	0,4
30.05	0,2	0,8
31.05	0,0	0,0
01.06	1,3	0,0
02.06	0,2	0,0
03.06	2,6	0,0
04.06	0,3	0,3
05.06	0,0	0,0
06.06	0,0	0,0
07.06	0,0	0,0

4 Разработка гидродинамического прогноза для г.Севастополя

4.1 Используемая модель и её характеристики

Weather Research and Forecasting (WRF) – одна из самой современных систем численного прогнозирования погоды и моделирования атмосферы.

Модель WRF-ARW позволяет прогнозировать погоду для заданной области земного шара в определенные моменты времени.

Наряду с практическим использованием численного прогноза погоды, приложения WRF включают исследования по усвоению метеорологических наблюдений, разработку схем параметризации физических процессов в атмосфере, моделирование регионального климата, анализ распространения загрязняющих веществ в атмосфере, взаимодействие атмосферы и океана, а также моделирование идеализированных случаев, представляющих интерес для теоретических исследований. Как программное обеспечение, WRF используется в научных и практических целях по всему миру и продолжает развиваться [6].

Основные компоненты WRF это динамические ядра (ARW и NMM), программные модули для представления физических процессов (Physics Packages) и интерфейс их взаимодействия с динамическими ядрами (Physics Interface). Внешними компонентами WRF являются система подготовки входных данных WRF Preprocessing System (WPS), система OBSGRID для объективного анализа данных метеонаблюдений, различные программные инструменты для визуализации и постобработки (пост-процессинга) выходных данных WRF (результатов моделирования) [7].

При адаптации модели WRF-ARW к региону исследований была выбрана сетка, покрывающая территорию Республики Крым с городом Севастополем в центре расчётной области. Расчётная область представлена на рисунке 4.1.

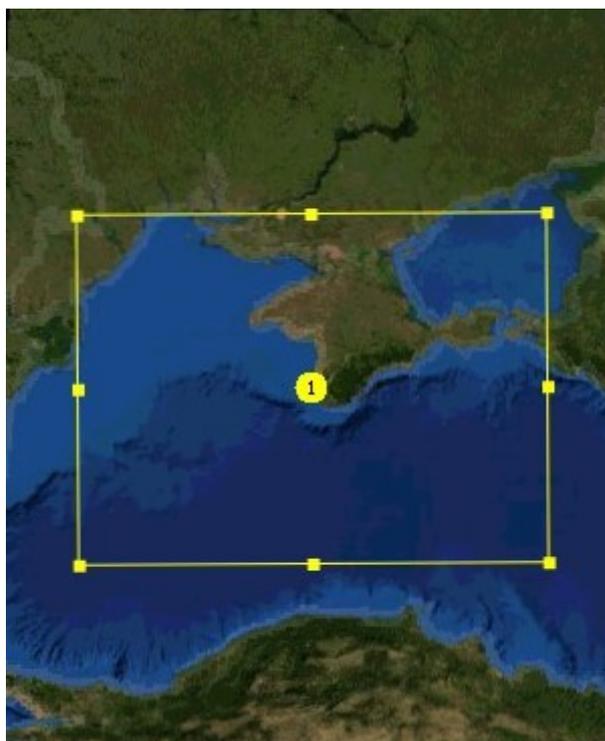


Рисунок 4.1 – Расчетная область для гидродинамического прогноза в г. Севастополе

Город Севастополь имеет следующие координаты: $44,3^{\circ}$ с.ш., $33,3^{\circ}$ в.д. Поэтому для верификации результатов моделирования на сетке была выбрана точка с соответствующими координатами. Координаты у узла, по которым происходила верификация: $44,6^{\circ}$ с.ш., $33,5^{\circ}$ в.д.

Шаг сетки и количество расчётных узлов устанавливается в файле `namelist.input`. Для разработки гидродинамического прогноза температуры воздуха и осадков в городе Севастополе была создана модельная область (рисунок 4.1), в центре которой располагается регион исследования. Расчётная сетка содержит 150 узлов вдоль оси абсцисс и 200 узлов вдоль ординаты. Шаг по горизонтальным координатам: 3 км по координате X, 3 км по координате Y, а шаг по времени 20 секунд. Область моделирования представляет собой прямоугольник в полярной стереографической картографической проекции и задаётся в системе подготовки данных WPS. Картографическая проекция, используемая в данной работе – полярная стереографическая проекция – наилучшая для прогноза в средних широтах.

Для описания влияния рельефа Земли на поля метеорологических величин в WRF-ARW используем географические данные. Разрешение географических данных также определяется при выборе области моделирования. В данном варианте модели используются географические данные с разрешением 30 секунд. Все эти характеристики модельной сетки прописываются в управляющих файлах `namelist.input` и `namelist.wps`, которые представлены в приложении А.

Численные эксперименты проводились для осени, поскольку в этот сезон года наблюдается большое количество осадков.

Проводилось несколько циклов численных экспериментов, в которых варьировались схемы параметризации конвективных процессов. Схемы описания параметризации конвективных процессов, использованные в базовом варианте в этом исследовании:

1. Без параметризации конвекции;
2. Схема Grell-3;
3. Схема Tiedtke.

4.2 Данные, используемые в исследовании

Начальные данные для модели получены из анализа GFS [8] с пространственным разрешением $0,25^\circ$ долготы на 0.25° широты за 00. Граничные условия по данным этого анализа обновлялись каждые 6 часов - 06, 12, 18 UTC. Пример начального поля температуры воздуха (00:00 9 октября 2020 года) приведён на рисунке 4.2. В начальных полях отсутствовала информация об осадках.

Фактические данные о температуре воздуха и осадков на метеостанции в г. Севастополь получены с сайта РП5 [9].

При нашем использовании модели для прогноза в качестве начальных условий используется информация о температуре, влажности, компонентах скорости ветра и осадках.

Моделирование было произведено для октября 2020 года, поскольку в это время года на территории Крыма с большей вероятностью выпадают осадки. Для того чтобы результаты с точки зрения статистики были более точными нужно взять для моделирования не менее 30 дней. Ввиду вышесказанного, разрабатывался прогноз метеорологических величин в период с 01.10.2020 по 01.11.2020 года с заблаговременностью 24 часа. Начало прогностического времени 00 часов (UTC). Было проведено несколько серий численных экспериментов, в каждом из которых было сделано 30 прогнозов.

Для визуализации результатов прогнозов был использован комплекс анализа и визуализации GRADS. Разработанные скрипты приведены в приложении Б.

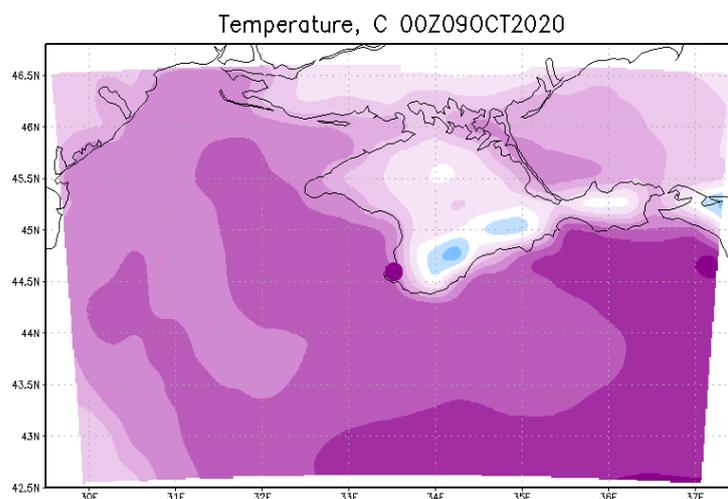


Рисунок 4.2 – Начальное поле температуры воздуха за 00:00 09.10.2020

Основное внимание остановим на прогнозе температуры и осадков. Для каждого дня в октябре 2020 года были спрогнозированы и проанализированы прогностические поля температуры и осадков.

Пример результатов моделирования – поля прогноза температуры и осадков за 09.10.2020 - представлен на рисунке 4.2. Анализировались прогностические поля с дискретностью 6 часов. На рисунке 4.2 представлены прогностические поля температуры воздуха (левая панель) и количества осадков (правая панель) в моменты времени 6, 12, 18, 24 часа сверху вниз.

Также был произведен анализ скорости ветра.

Пример прогностических полей представлен на рисунке 4.3. Дискретность данных полей также составляет 6 часов. На рисунке 4.3 изображен прогноз скорости ветра за 00, 06, 12, 18, 24 часа.

Качество прогноза было оценено двумя методами:

1. С использованием результатов анализа модели GFS;
2. С использованием результатов наблюдений на метеорологической станции.

Расположение метеорологической станции в Севастополе (город Севастополь, Россия): $44^{\circ}62'$ с.ш., $33^{\circ}53'$ в.д., высота над уровнем моря 6 м. На всех приводимых полях метеорологических величин город Севастополь помечен чёрной точкой.

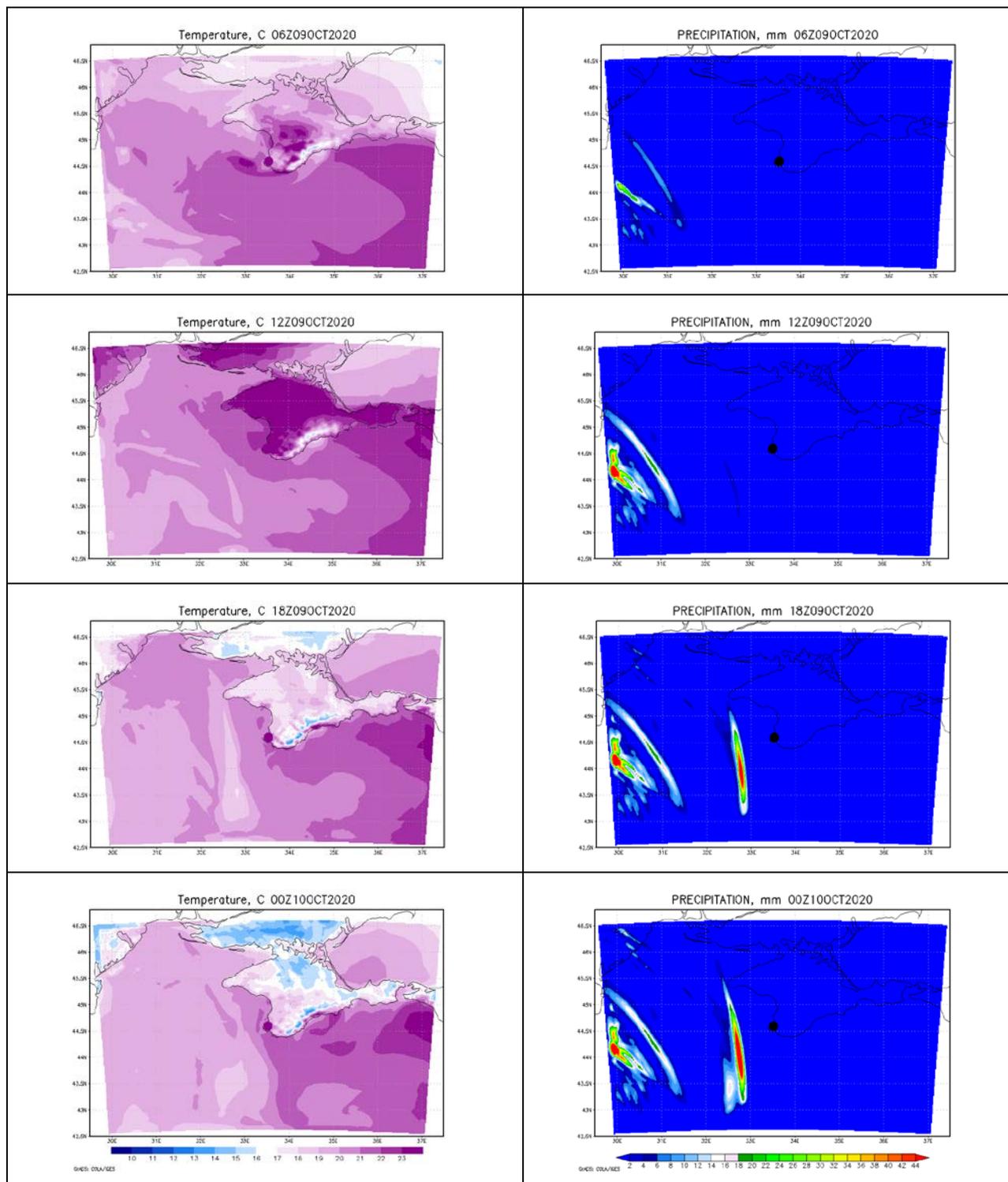


Рисунок 4.2 – Прогностические поля приземной температуры воздуха и количества осадков для всего расчетного региона. Прогноз от 00:00 09 октября 2020 года. Объяснение в тексте

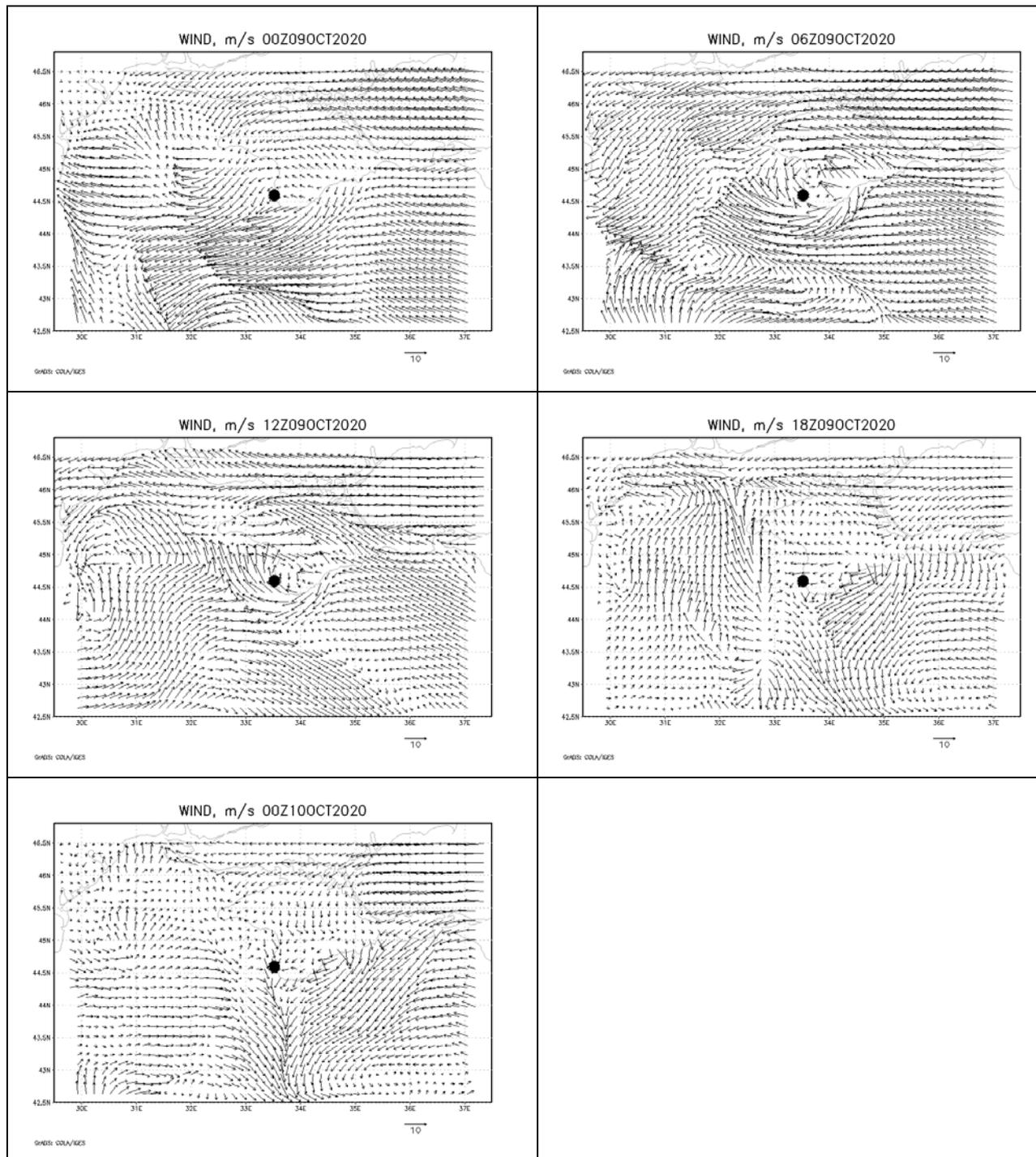


Рисунок 4.3 – Прогностические поля горизонтальной скорости ветра.

Прогноз от 00:00 09 октября 2020 года. Объяснение в тексте

4.3 Верификация прогностических полей по данным анализа GFS

На первом этапе оценки качества прогнозов было проведено сравнение с данными анализа модели GFS. В качестве критерия успешности прогноза рассчитывалась разница прогностического и фактического значения метеорологической величины.

Поскольку в данных анализа, которые использовались для оценки прогнозов, нет информации о количестве осадков, то для первоначальной характеристики качества прогноза влагозапаса атмосферы (который может характеризовать и количество осадков) использовалась оценка ошибки прогноза массовой доли водяного пара. Пример пространственного распределения ошибок прогноза температуры и массовой доли водяного пара за 02 октября 2020 года представлен на рисунках 4.4 и 4.5.

Анализируя поля ошибок, представленные на рисунке 4.4, можно сделать вывод о том, что ошибка прогноза температуры воздуха сильно варьируется, достигая максимальных значений на побережье. Прослеживается тенденция – над сушей ошибка отрицательная, а значит, температура занижается, а над водной поверхностью ошибка положительная – температура завышается. В интересующей нас точке г. Севастополь ошибка составляет 2°C. В данной модели, которая используется в этой работе, показатель точности близок к 100%. Такую модель можно назвать оптимальной для прогноза температуры.

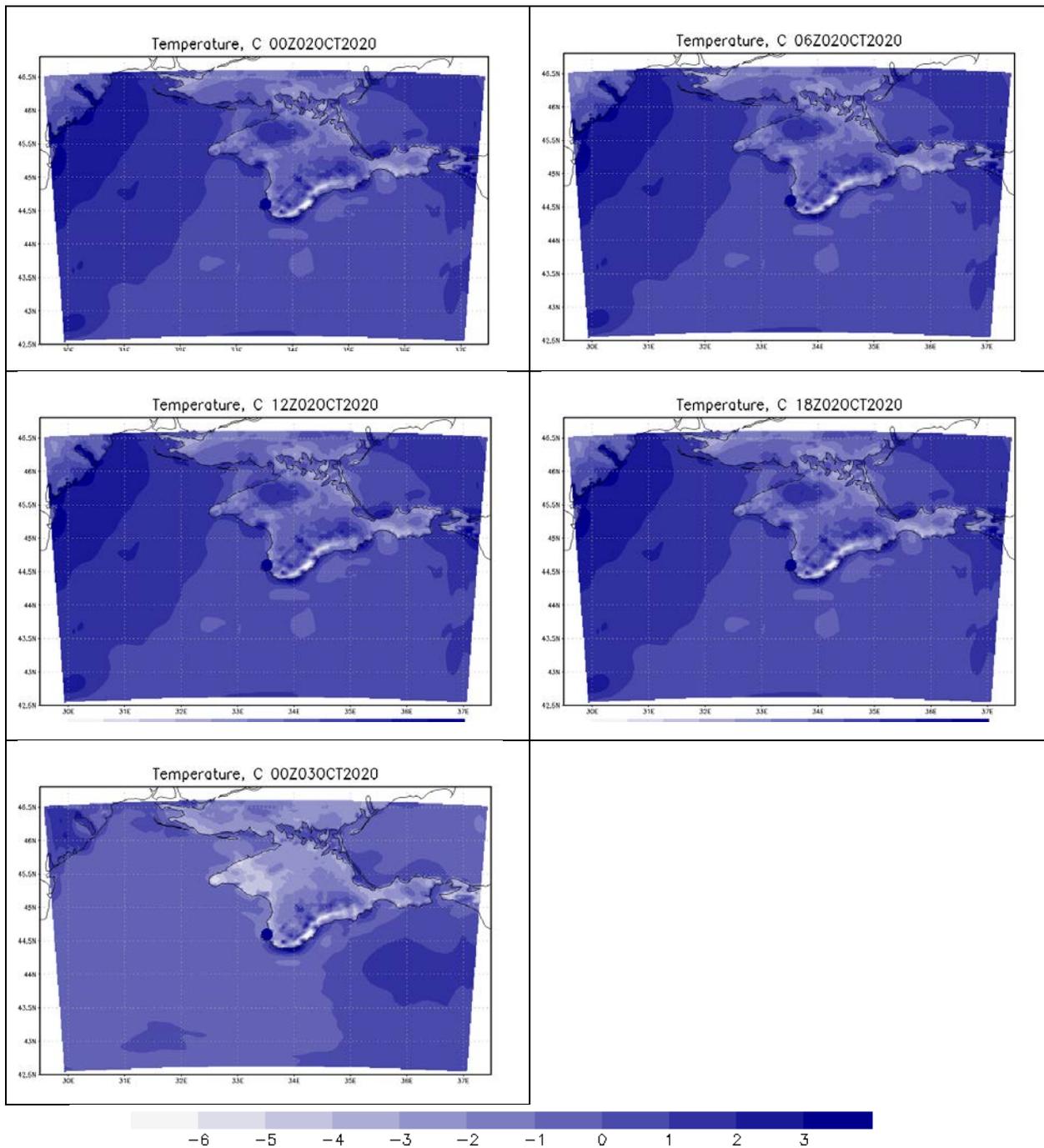


Рисунок 4.4 – Ошибка прогноза температуры воздуха для всего расчетного региона. Прогноз от 00:00 02 октября 2020 года.

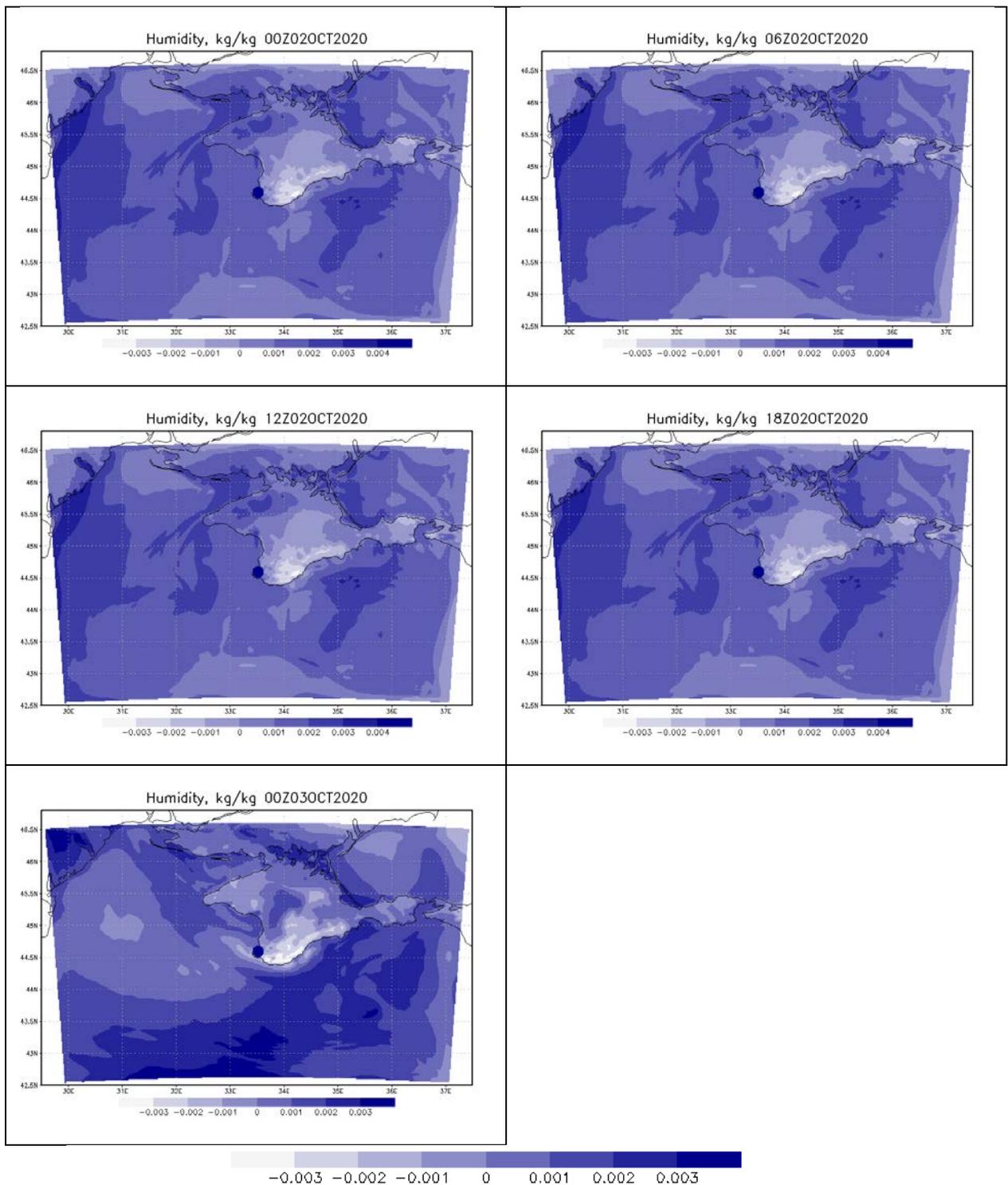


Рисунок 4.5 – Разница массовой доли водяного пара для всего расчетного региона. Прогноз от 00:00 02 октября 2020 года. Объяснение в тексте

Анализируя поля ошибки прогноза массовой доли водяного пара, приведенной на рисунке 4.5, мы делаем вывод о том, что, как и у температуры, прослеживается тенденция – над сушей ошибка отрицательная, а значит,

массовая доля водяного пара занижается, а над водной поверхностью ошибка положительная – массовая доля водяного пара завышается.

В нашем случае модель завышает влажность воздуха на 0,001 кг/кг. Такая модель также подходит для прогнозирования массовой доли водяного пара.

4.3.1 Влияние параметризации физических процессов на качество моделирования

Физические процессы подсеточного масштаба описываются различными схемами параметризаций. Выбор их в модели WRF устанавливается в файле namelist.input. Ниже в таблице 4.1 представлены имеющиеся в WRF параметризации конвективных процессов [10], рассматриваемых в этом разделе.

Таблица 4.1 – Параметризации конвективных процессов в WRF-ARW [10]

Номер параметризации cu_physics	Схема
1	Kain-Fritsch Eta
2	Betts-Miller-Janjic
3	Grell-Freitas
4	Old Simplified Arakawa-Schubert
5	Grell-3
6	Tiedtke
7	Zhang-McFarlane
14	New SAS
84	New SAS (HWRF)
93	Grell-Devenyi
99	Old Kain-Fritsch

В этой главе описываются численные эксперименты по выбору лучшей параметризации конвективных процессов, при которой прогноз приземной температуры воздуха для Крыма наиболее успешен.

В численных экспериментах, которые были описаны ранее, не учитывалась конвекция потому, что шаг составляет 3 км и при таком шаге есть вероятность, что конвекция будет описана без параметризации.

Для того чтобы улучшить качество прогноза, были проведены численные эксперименты с использованием двух схем параметризации конвективных процессов. Это параметризация Grell-3 и параметризация Tiedtke. Ниже на рисунке 4.6 представлены результаты верификации моделирования за 02 октября 2020 года с использованием вышеописанных схем параметризации конвективных процессов.

На рисунке 4.6 представлена разница температуры, но уже с использованием схем параметризации. Левая колонка – без параметризации, центральная – параметризация Grell-3, правая – параметризация Tiedtke.

Проанализировав рисунок 4.6, мы видим, что с использованием схем параметризации конвекции, разница фактических и прогностических значений увеличивалась. При применении схемы Grell-3 ошибка сравнительно меньше результатов - 2°C, полученных при использовании схемы Tiedtke - 3°C. Для Tiedtke видно ухудшение прогноза за весь срок.

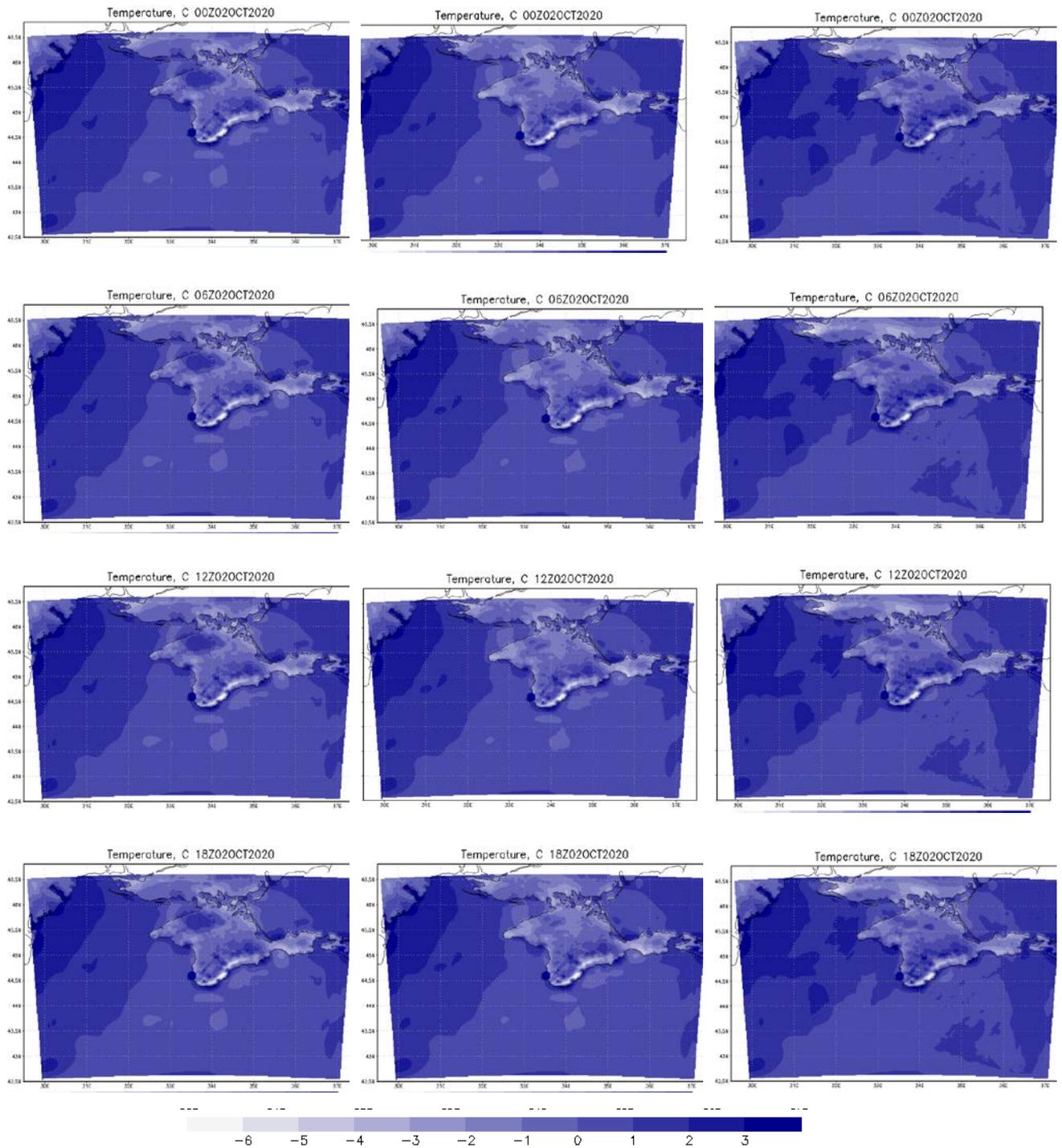


Рисунок 4.6 – Ошибка прогноза температуры для всего расчетного региона, с использованием схем параметризации конвективных процессов. Прогноз от 00:00 02 октября 2020 года

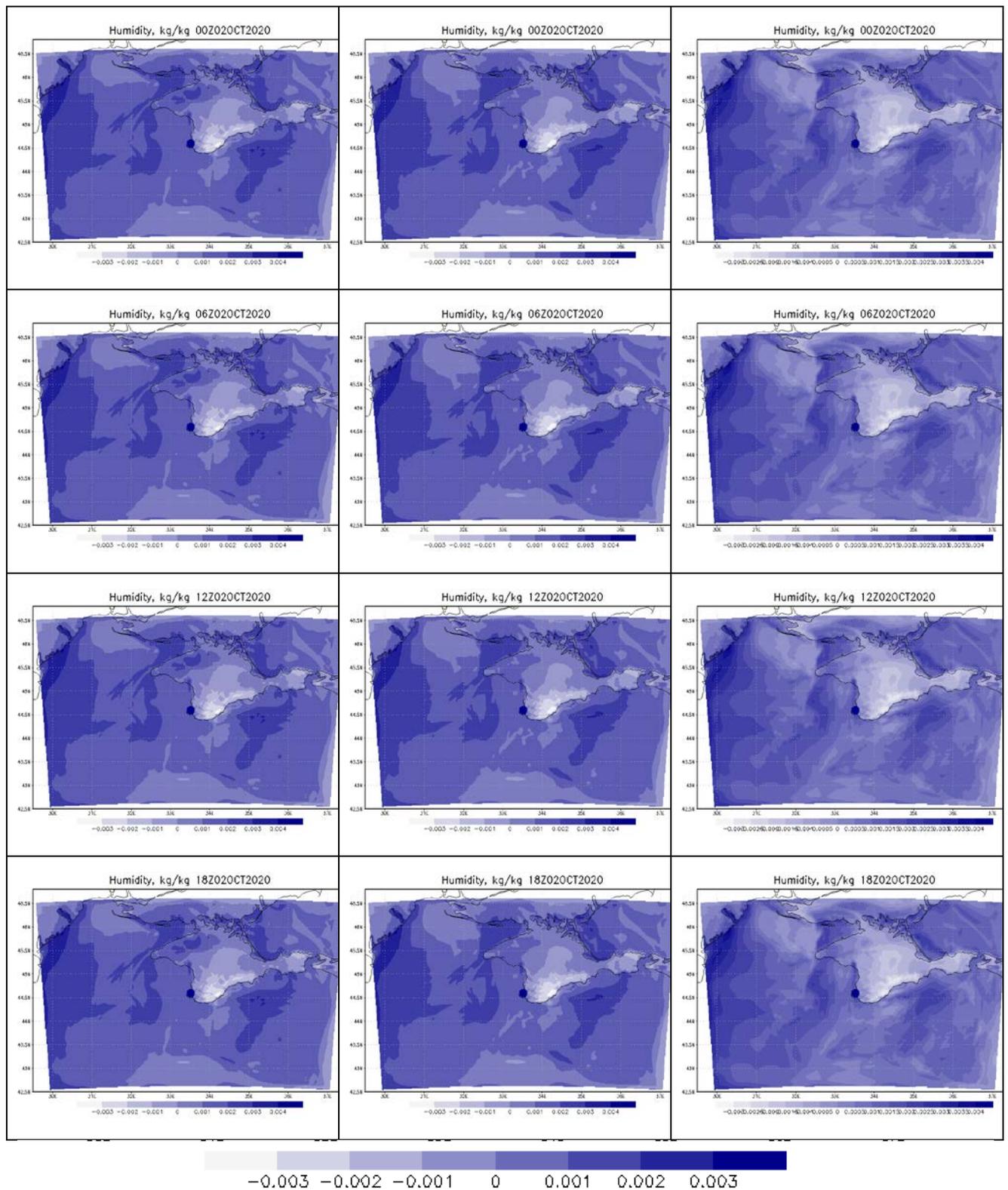


Рисунок 4.7 – Ошибка прогноза массовой доли водяного пара для всего расчетного региона, с использованием схем параметризации конвективных процессов. Прогноз от 00:00 02 октября 2020 года

На рисунке 4.7 изображено сравнение фактических и прогностических значений массовой доли водяного пара с использованием схем параметризации.

Делая анализ данного рисунка, видно, что при использовании схемы Tiedtke, ошибка в прогнозе массовой доли водяного пара намного меньше, чем при использовании других схем.

Ниже на рисунке 4.8 представлены результаты верификации моделирования за 30 октября 2020 года с использованием вышеописанных схем параметризации конвективных процессов.

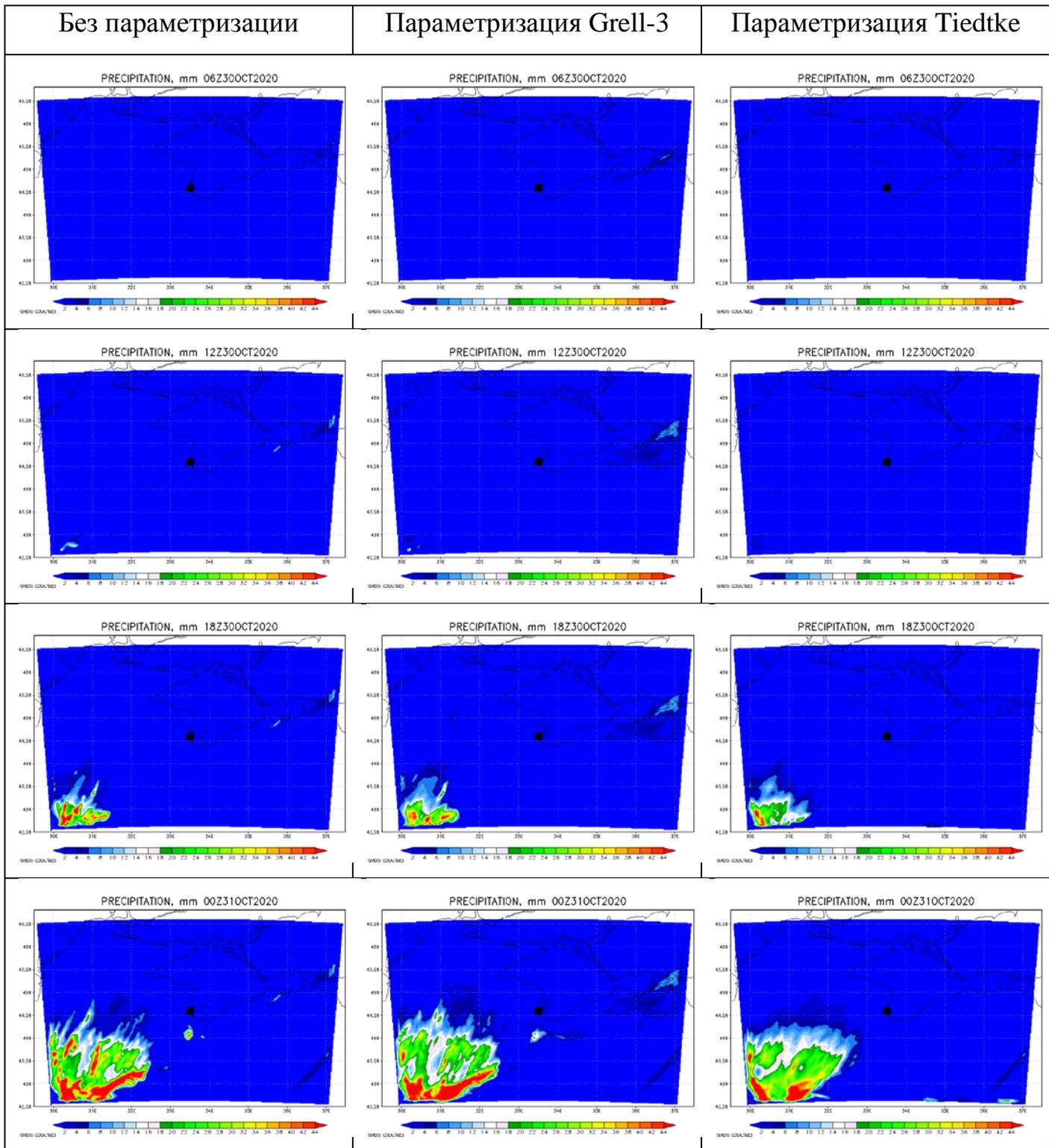


Рисунок 4.8 – Прогностические поля количества осадков для всего расчетного региона, с использованием схем параметризации конвективных процессов. Прогноз от 06:00 30 октября 2020 года. Объяснение в тексте

На рисунке 4.8 в период 06 часов 30.10 по 00 часов 31.10 сложно выявить преимущество использования одной из схем параметризации, однако параметризация Grell-3 показывает лучшие результаты относительно другой.

На основании вышеприведенных рисунков, схему Grell-3 следует признать наиболее оптимальной для моделирования осадков в г. Севастополь.

4.4 Верификация по данным наблюдений на метеорологической станции

Далее была проведена верификация прогноза по данным наблюдений. На рисунке 4.9 приведен пример фактических значений метеорологических величин.

Программа для обработки дистанционных данных представлена в приложении В.

В результате работы этой программы, мы получили значения, приведенные в таблице 4.2.

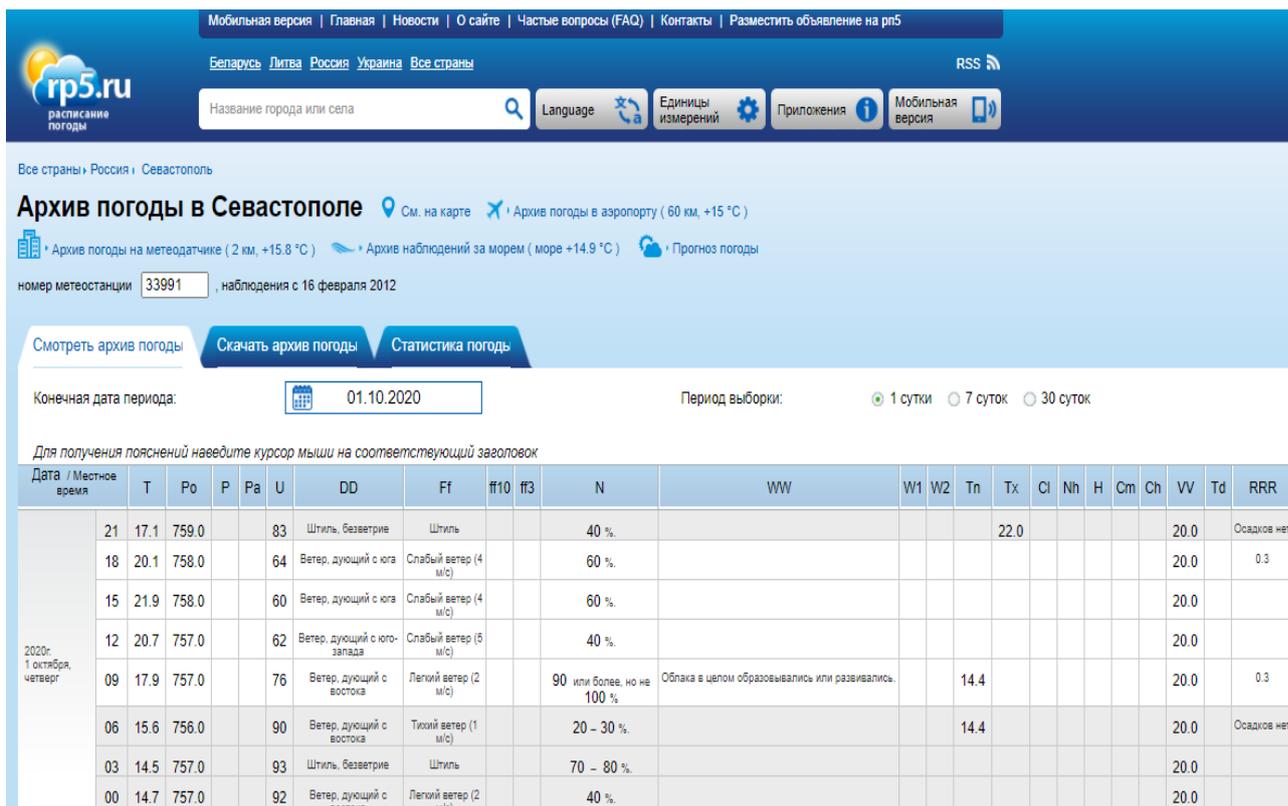


Рисунок 4.9 – Пример метеорологических величин, выбранных на метеорологической станции г. Севастополя 01.10.2020 с сайта rp5.ru [9]

Таблица 4.2 – Пример фактических значений массовой доли водяного пара, температуры воздуха и компонент скорости ветра, полученных с помощью программы со станции г. Севастополя за период с 01.10.2020 по 11.10.2020 года

Дата	Q, кг/кг	T, К	U, м/с	V, м/с
02.10.2020	0,00975	292,9	1,7	5,4
03.10.2020	0,01024	293,8	0,5	3,8
04.10.2020	0,01012	293,5	-3,6	2,3
05.10.2020	0,01103	293,6	-5,4	2,1
06.10.2020	0,01155	294,3	-6,7	2,4
07.10.2020	0,01160	294,0	-11,6	7,2
08.10.2020	0,01101	294,1	-12,4	4,5
09.10.2020	0,00953	294,7	-5,6	-2,9
10.10.2020	0,01207	294,1	5,6	-3,9
11.10.2020	0,01074	292,6	3,8	4,1

Были проанализированы все тридцать прогнозов за октябрь 2020 г. Для каждого дня для г. Севастополя была проведена оценка качество прогноза и составлены графики.

На рисунке 4.10 представлены прогностическое и фактическое значения температуры воздуха. Средняя ошибка прогноза температуры равна 0,5°C. Наибольшая ошибка наблюдается 25 октября и составляет 3°C.

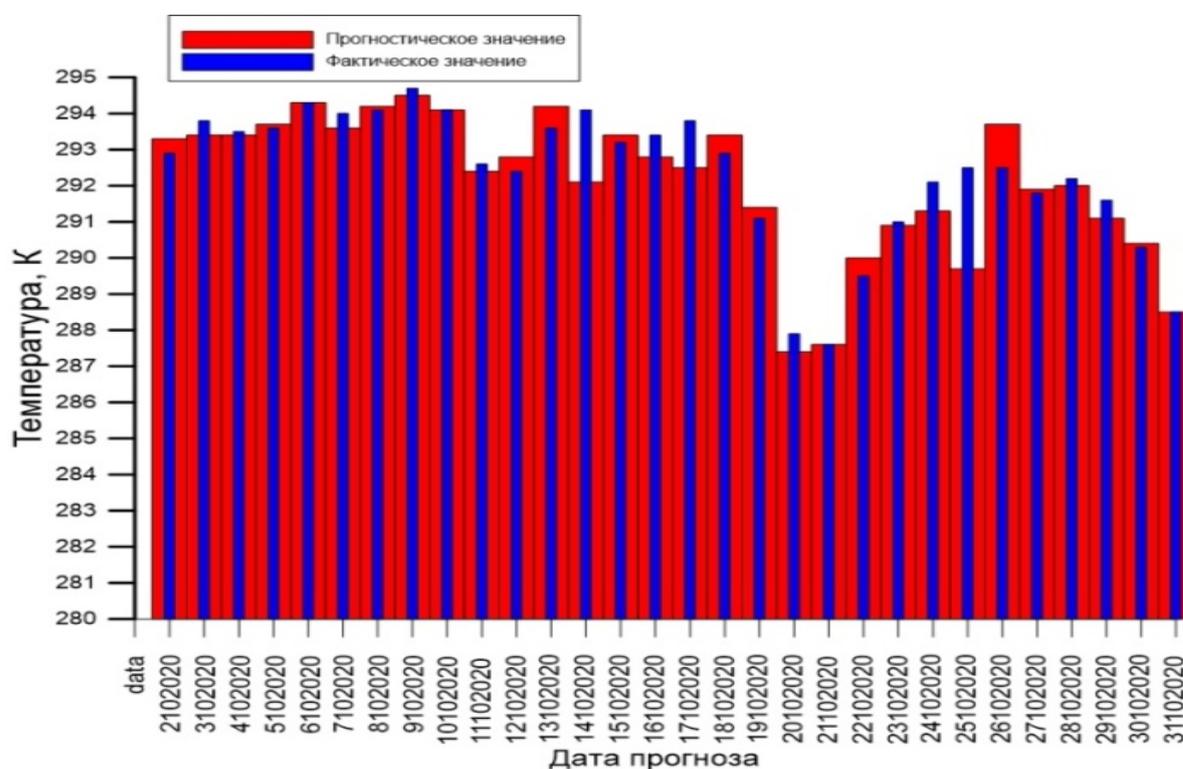


Рисунок 4.10 – Прогностическое и фактическое значения температуры (К) за весь период с 01.10 по 01.11 2020 года

Оценка оправдываемости прогноза температуры воздуха производится путем сравнения прогностических значений температуры воздуха с фактически измеренными значениями температуры воздуха, данные наблюдений которых используются для оценки прогноза. Прогноз температуры воздуха по пункту считается оправдавшимся ($P_{\text{П}} = 100\%$), если фактическая температура воздуха находится в пределах прогнозируемой градации или отличается от крайних значений градации не более чем на 2 °С. Если фактическая температура отличается от крайних значений прогнозируемой градации более чем на 2 °С, то прогноз считается не оправдавшимся, т. е. $P_{\text{П}} = 0\%$ [11].

Основываясь на рекомендациях по краткосрочным прогнозам, можно сделать вывод, что для всех дней прогноза (02.10 -31.10) прогноз оправдался ($P_{\text{П}} = 100 \%$), кроме 25 октября, так как ошибка составила 3°C . Следовательно, в этот день прогноз не был оправдан.

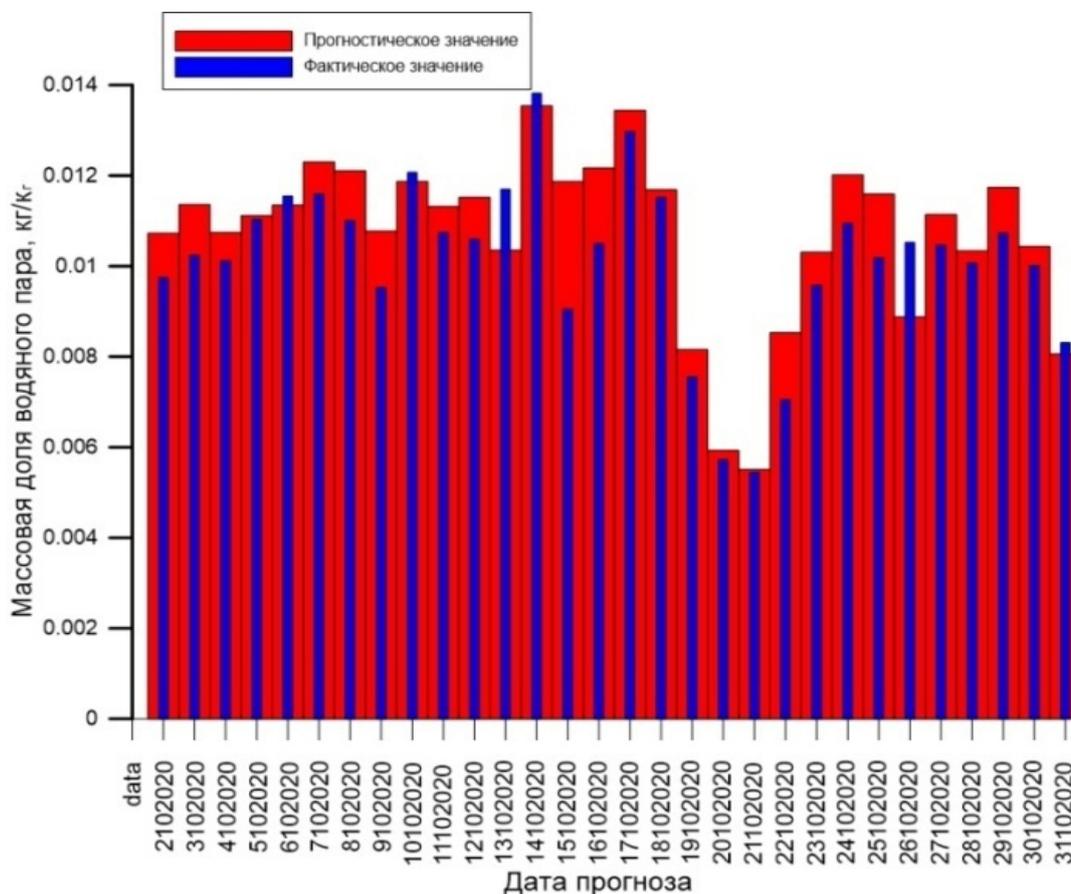


Рисунок 4.11 – Прогностическое и фактическое значения массовой доли водяного пара (кг/кг) за весь период с 01.10 по 01.11 2020 года

На рисунке 4.11 представлены прогностическое и фактическое значения массовой доли водяного пара. Средняя ошибка - 0,001 кг/кг. Наибольшая ошибка равна 0,0022 кг/кг и наблюдается 26 октября.

Исходя из представленных рисунков, можно сделать вывод, что с точки зрения температуры и массовой доли водяного пара, прогноз был успешен.

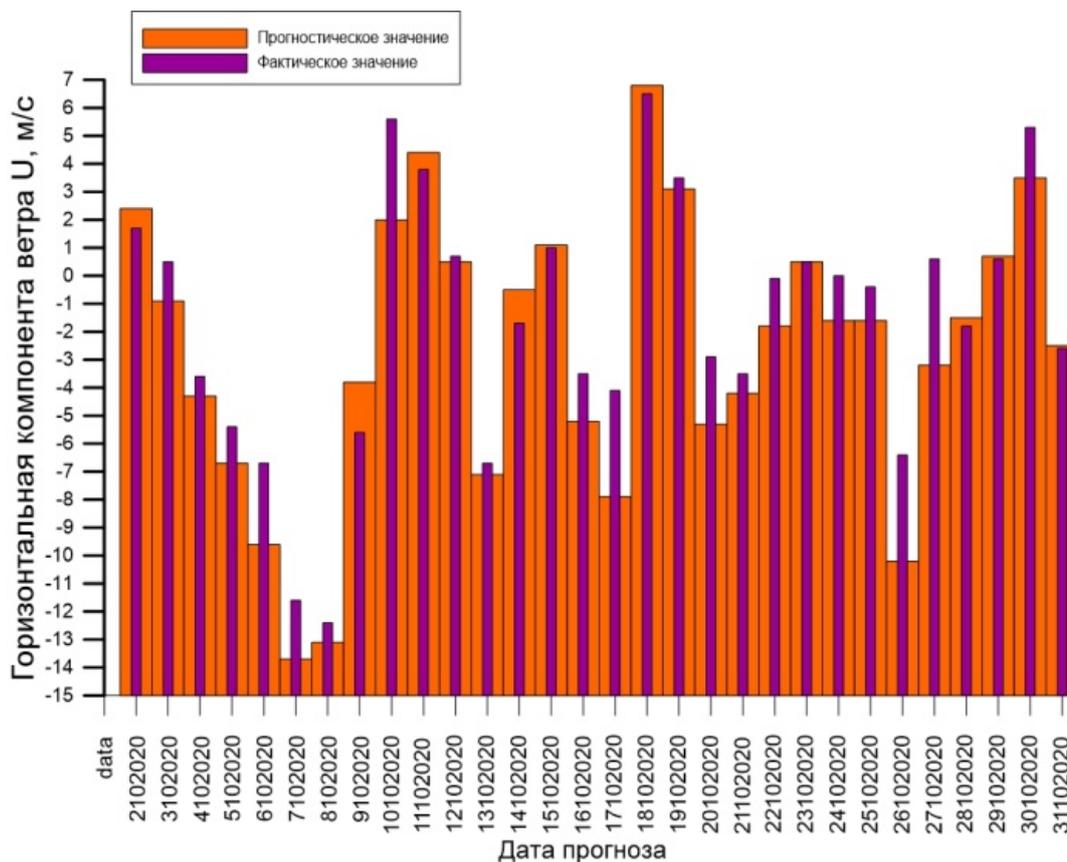


Рисунок 4.12 – Прогностическое и фактическое значения для зональной компоненты скорости ветра U (м/с) за весь период с 01.10 по 01.11 2020 года

На рисунке 4.12 - прогностическое и фактическое значения для зональной компоненты скорости ветра U . Средняя ошибка - 1,3 м/с. Наибольшая ошибка равна 3 м/с и наблюдается 10, 16, 20, 27 октября.

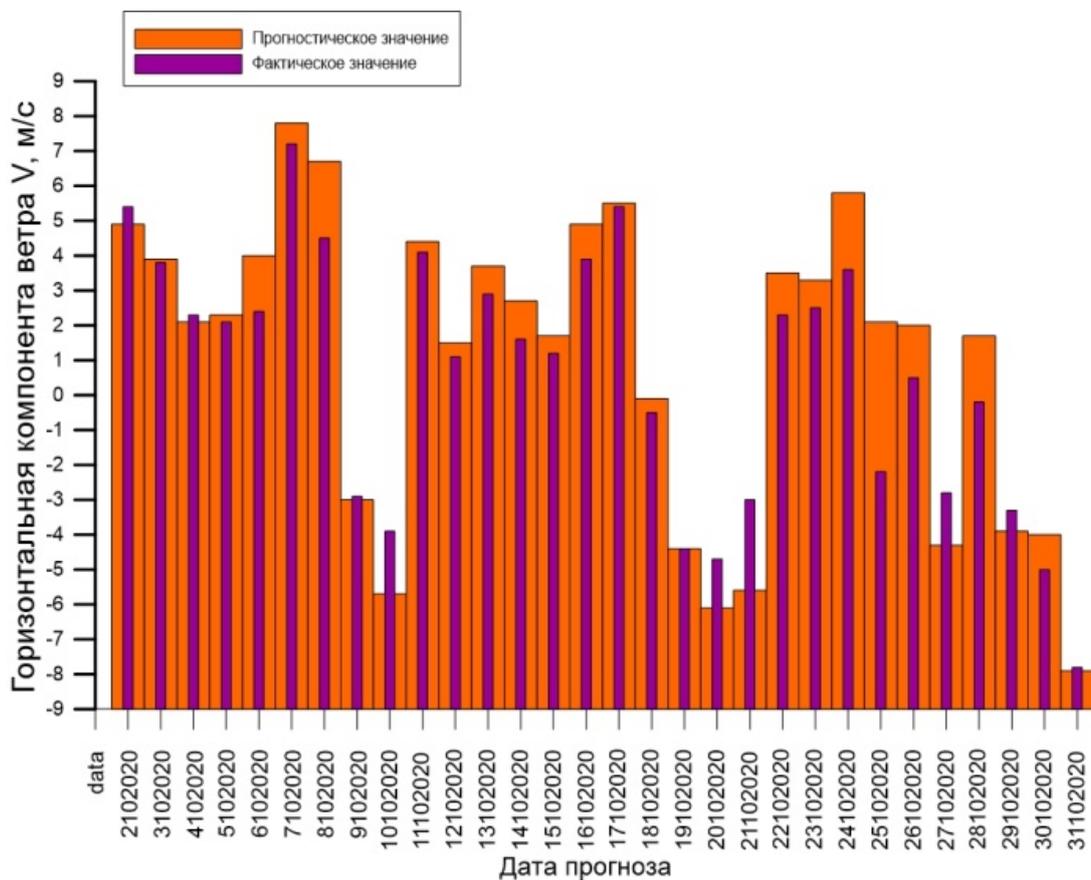


Рисунок 4.13 – Прогностическое и фактическое значения для меридиональной компоненты скорости ветра V (м/с) за весь период с 01.10 по 01.11 2020 года

На рисунке 4.13 видим прогностическое и фактическое значения для меридиональной компоненты скорости ветра V . Здесь ошибка меньше, чем на рисунке 4,12. Средняя ошибка равна 1,0 м/с. Наибольшая ошибка равна 3 м/с и наблюдается 21 октября.

Оценка оправдываемости прогноза скорости ветра производится путем сравнения прогностических значений скорости ветра с фактически наблюдавшейся максимальной скоростью ветра по данным каждого пункта, наблюдения которых используются для оценки прогноза. Прогноз скорости ветра по пункту считается оправдавшимся ($P_w = 100\%$), если фактическая максимальная скорость ветра находится в пределах прогнозируемой градации или отличается от крайних значений градации не более чем на 2 м/с [11].

Если фактическая максимальная скорость ветра отличается от крайних значений прогнозируемой градации более чем на 2 м/с, то прогноз считается не оправдавшимся ($P_w = 0\%$) [11].

Исходя из всех вышеперечисленных факторов и анализа рисунков, можно сделать вывод о том, что прогноз скорости ветра был оправдан почти во все дни прогноза, кроме 10, 16, 20, 21, 27 октября. В эти дни фактические значения скорости ветра отличаются от крайних значений прогнозируемой градации на 3 м/с. Из этого следует, что в данные дни прогноз считается не оправдавшимся.

Синоптическая ситуация, в те дни, когда были наибольшие ошибки, проанализирована с помощью приземных синоптических карт за соответствующие сроки [12].

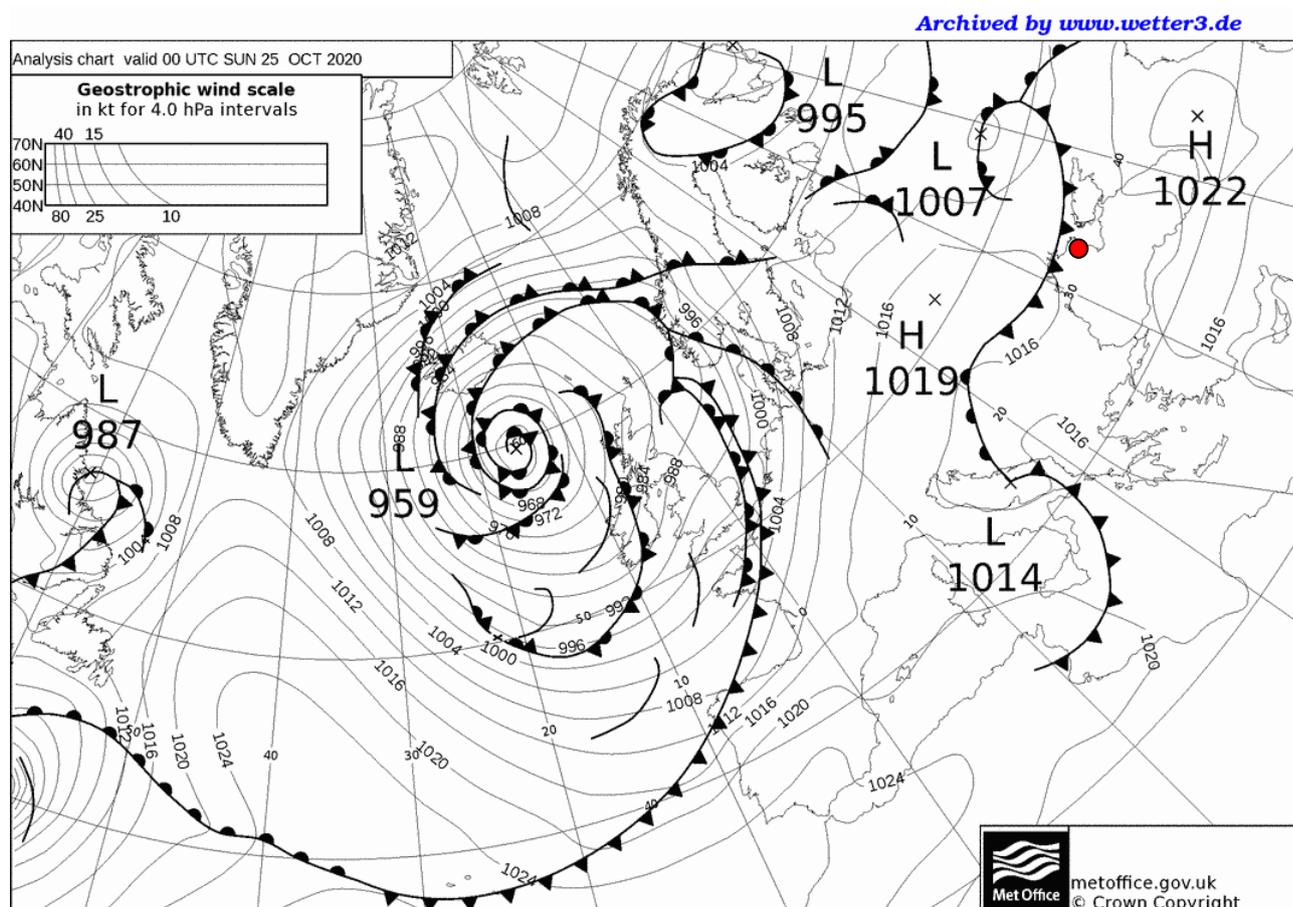


Рисунок 4.14 – Синоптическая карта с сайта «Wetterzentrale» за срок 00 UTC 25 октября

Проанализировав синоптическую приземную карту за 00 часов 25 октября (рисунок 4.14), видно, что Севастополь находился под влиянием холодного фронта. И была перестройка атмосферной циркуляции, которую не удалось смоделировать. Требуется дополнительные исследования, например, по изменению схемы параметризации пограничного слоя атмосферы.

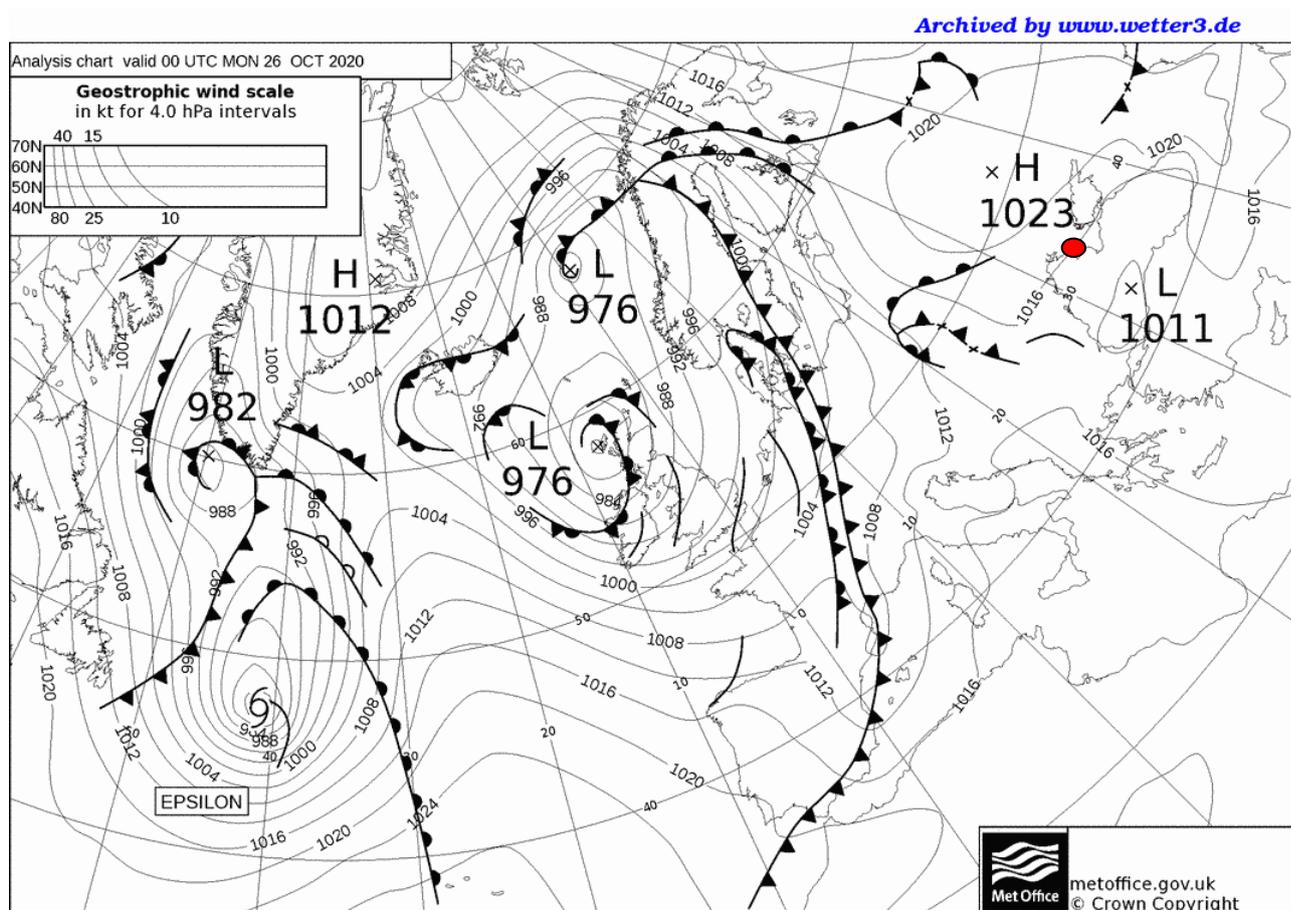


Рисунок 4.15 – Синоптическая карта с сайта «Wetterzentrale» за срок 00 UTC 26 октября

Анализируя рисунок 4.15, а именно представленную синоптическую карту за 00 часов 26 октября. Возле района прогноза малоградиентное поле, ситуация сложная и изменчивая.

4.5 Параметризации, применяемые в модели

В таблице 4.3 приведены даты, когда наблюдались осадки на станции г. Севастополя, полученные с сайта gp5.ru [9].

Таблица 4.3 – Фактические значения количества осадков, полученные с сайта gp5.ru [9]

Дата	Количество осадков, мм/12 ч
02.10.2020	52,0
10.10.2020	5,0
11.10.2020	6,4
14.10.2020	1,0
17.10.2020	0,7
18.10.2020	5,0
28.10.2020	1,0
30.10.2020	4,0

Далее, спрогнозировав осадки с помощью модели WRF-ARW, нами было обнаружено, что осадки были плохо спрогнозированы. Пример прогноза осадков приведён в таблице 4.4.

В модели WRF-ARW прогнозируется три вида осадков:
конвективные, связанные с глубокой конвекцией,
конвективные, связанные с мелкой конвекцией,
осадки, связанные со слоистообразной облачностью.

В таблице 4.4 приведено прогностическое количество осадков, связанное с разными процессами в атмосфере и суммарное количество осадков, которое и оценивается.

Таблица 4.4 - Прогнозируемые значения осадков без учета параметризации, мм/12 ч

Дата	Конвективная облачность	Слоистая облачность	Мелкоконвективная облачность
02.10.2020	0,0	0,0	0,0
10.10.2020	0,0	0,0	0,2
11.10.2020	0,0	0,0	4,5
14.10.2020	0,0	0,0	0,0
17.10.2020	0,0	0,0	0,0
18.10.2020	0,0	0,0	0,0
28.10.2020	0,0	0,0	0,0
30.10.2020	0,0	0,0	0,0

В таблице 4.4 приведены даты, когда осадки были плохо спрогнозированы. Сделав анализ результатов численных экспериментов без учёта параметризации конвекции, был сделан вывод о том, что при такой конфигурации модели прогноз осадков для г. Севастополя не оправдан.

Для того чтобы улучшить качество прогноза были использованы 2 схемы параметризации конвективных процессов. Это параметризация Grell-3 (5) и параметризация Tiedtke (6) [10].

В таблице 4.5 представлены результаты верификации моделирования с использованием схем параметризации.

Таблица 4.5 - Прогнозируемые значения осадков с учетом схемы параметризации Grell-3, мм/12 ч

Дата	Конвективная облачность	Слоистая облачность	Мелкоконвективная облачность
02.10.2020	0,6	0,0	0,0
10.10.2020	3,9	0,0	0,1
11.10.2020	1,0	0,0	0,0
14.10.2020	0,8	0,0	0,0
17.10.2020	0,7	0,0	0,0
18.10.2020	0,0	0,0	0,0
28.10.2020	0,3	0,0	0,0
30.10.2020	0,1	0,0	0,6

Таблица 4.6 - Прогнозируемые значения осадков с учетом схемы параметризации Tiedtke, , мм/12 ч

Дата	Конвективная облачность	Слоистая облачность	Мелкоконвективная облачность
02.10.2020	0,0	0,0	0,0
10.10.2020	0,0	0,0	0,0
11.10.2020	0,0	0,0	0,1
14.10.2020	0,2	0,0	0,0
17.10.2020	0,0	0,0	0,0
18.10.2020	0,0	0,0	0,0
28.10.2020	0,0	0,0	0,0
30.10.2020	0,0	0,0	0,0

Из таблиц 4.5 и 4.6 четко видно, что используемая схема параметризации Grell-3 описывает фактические значения лучше, чем схема Tiedtke. Но результаты прогнозируемых значений ни у одной схемы не близки к

фактическим значениям. Но результаты прогнозируемых значений ни у одной схемы не близки к фактическим значениям. Из этого следует, что помимо параметризации конвекции, требуется дополнительные исследования, например, по изменению схемы параметризации пограничного слоя атмосферы.

В дальнейшем планируется продолжить исследования по гидродинамическому моделированию температуры и осадков на территории г. Севастополя и повысить его качество выбором лучшей схемы параметризации для данной территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленная в начале данной работы цель, а именно разработка гидродинамического прогноза температуры и количества осадков с использованием модели WRF-ARW на территории г. Севастополя, в ходе выполнения работы была полностью достигнута.

Для успешного достижения цели были решены следующие частные задачи:

1. Была изучена модель WRF-ARW и освоена работа с ней, проведены численные эксперименты;
2. Был изучен пакет GRADS для визуализации результатов моделирования;
3. Разработан прогноз метеорологических величин в период с 01.10.2020 по 01.11.2020 года;
4. Создан архив данных о количестве осадков и о приземной температуре воздуха в г. Севастополь;
5. Была произведена оценка качества моделирования.
6. Выполнен анализ полученных данных;

В соответствии с выполненной работой можно сделать следующие выводы:

1. Реализация модели WRF, для прогноза температуры и осадков для Севастополя, продемонстрировала хорошие возможности и перспективы ее использования;
2. В результате проведенного исследования получено, что рассчитанные характеристики точности модели представляются удовлетворительными: – прогноз для температуры воздуха является успешным; прогноз осадков по фактическим и прогностическим значениям оказался немного хуже;
3. Параметризации конвекции в модели привели к разной точности прогноза осадков. При прогнозе осадков лучший результат дала схема Grell-3. Худший результат оказался у схемы Tiedtke.

4. В дальнейшем планируется продолжить исследования по гидродинамическому моделированию температуры и осадков на территории г. Севастополя и повысить его качество выбором лучшей схемы параметризации физических процессов.

Также, проведенные эксперименты, позволяют сделать вывод о необходимости ассимиляции данных наблюдений для увеличения качества прогноза.

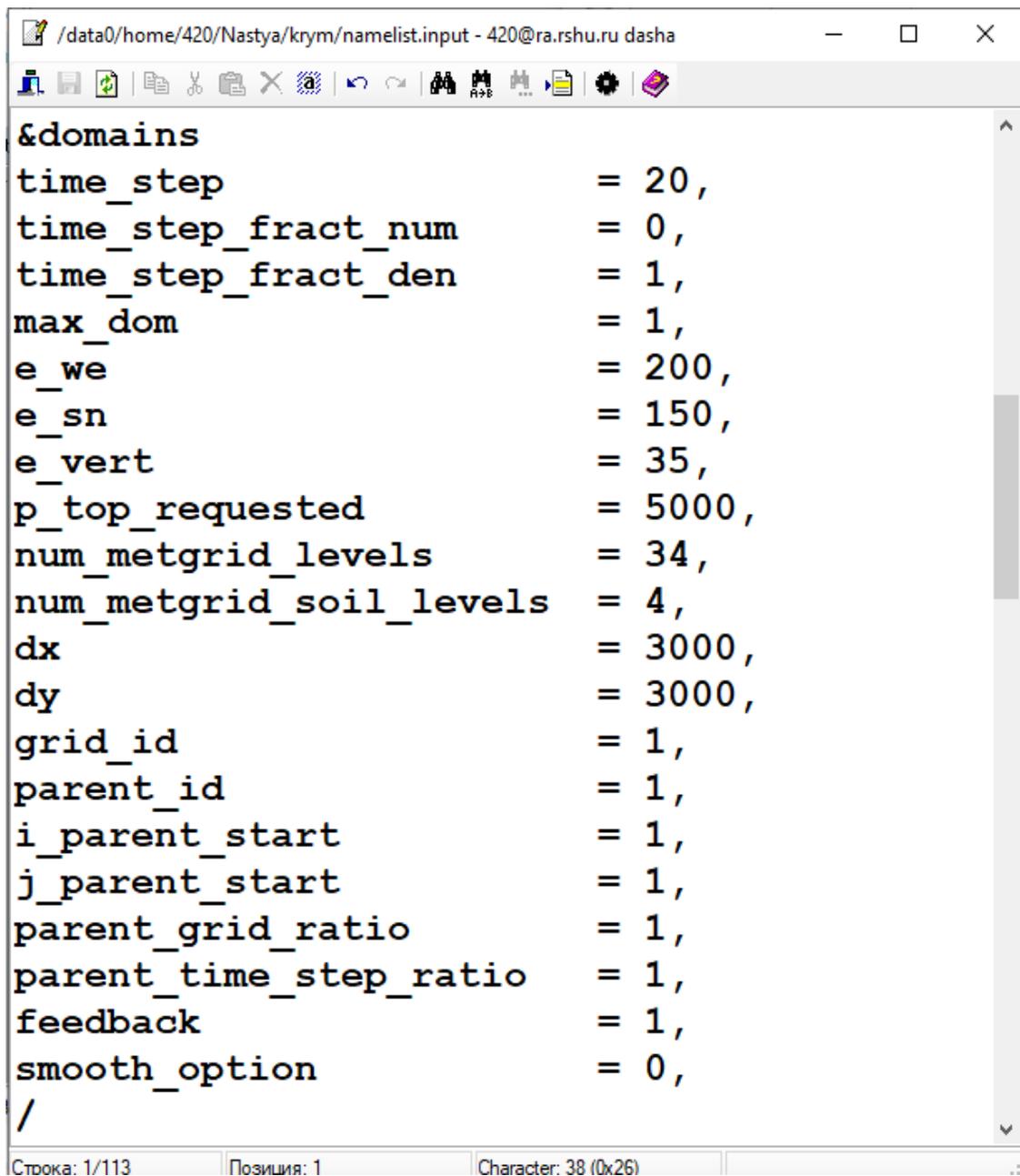
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, А.А. Прогноз погоды / А.А. Васильев, Р.М. Вильфанд. – Москва: Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 2008. – 60с.;
2. Толстых, М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития / М.А. Толстых. – Москва: ИВМ РАН, 2016. – 32с.;
3. География Севастополя: официальный сайт. – URL: http://krymology.info/index.php/География_Севастополя (дата обращения: 02.05.2020);
4. Климат Севастополя: официальный сайт. – URL: <https://nbcrs.org/regions/sevastopol/klimat> (дата обращения: 10.05.2021);
5. Карта Севастополя: официальный сайт. – URL: <https://www.google.com/maps/place/Севастополь> (дата обращения: 02.05.2020);
6. Skamarock, W.C. A Description of the Advanced Research WRF Version / W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X. Huang, W. Wang, J.G. Powers // NCAR Technical Note. – 2008. – NCAR/TN-475+STR. – Mode of access: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf (дата обращения: 16.05.2021);
7. ARW Version 3 Modeling System User's Guide [Electronic resource]. – 2009. - Mode of access: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v3/ (дата обращения: 16.05.2021).
8. Анализ GFS: официальный сайт. – URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (дата обращения: 13.02.2021);
9. Расписание погоды: официальный сайт. – URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 06.05.2021);
10. Jimy Dudhia. Overview of WRF Physics. NCAR/MMM

11. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения: Руководящий документ / [А. М. Кабак и др.]; под ред. А. М. Кабак. – Москва: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019 – 66 с.;

12. Архив карт погоды: официальный сайт. – URL: http://www1.wetter3.de/archiv_ukmet_dt.html (дата обращения: 20.05.2021).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

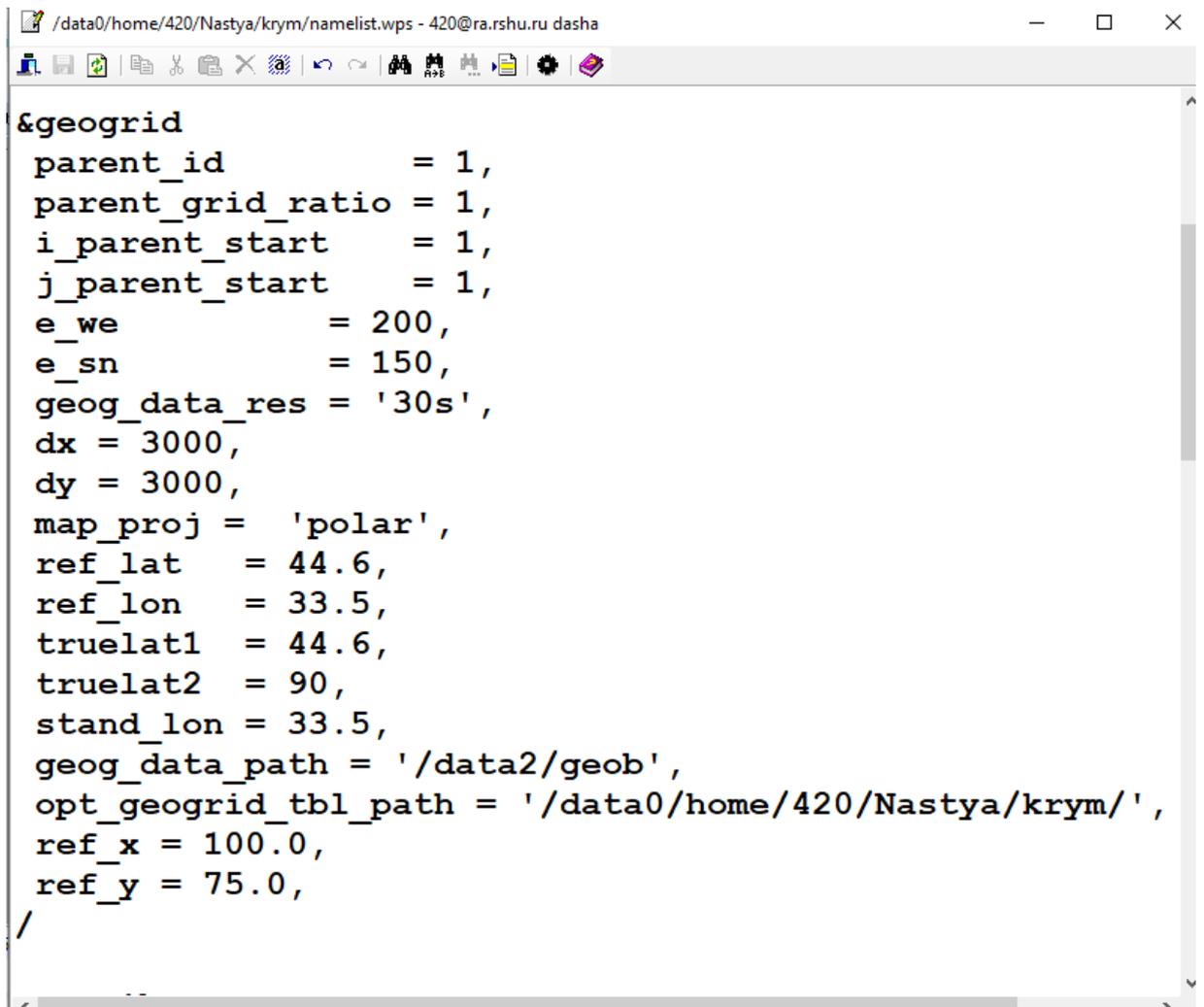


The image shows a screenshot of a text editor window. The title bar reads "/data0/home/420/Nastya/krym/namelist.input - 420@ra.rshu.ru dasha". The editor contains the following text:

```
&domains
time_step                = 20,
time_step_fract_num      = 0,
time_step_fract_den      = 1,
max_dom                  = 1,
e_we                    = 200,
e_sn                    = 150,
e_vert                  = 35,
p_top_requested          = 5000,
num_metgrid_levels       = 34,
num_metgrid_soil_levels  = 4,
dx                      = 3000,
dy                      = 3000,
grid_id                 = 1,
parent_id               = 1,
i_parent_start          = 1,
j_parent_start          = 1,
parent_grid_ratio        = 1,
parent_time_step_ratio   = 1,
feedback                = 1,
smooth_option           = 0,
/
```

At the bottom of the window, there is a status bar with the following information: "Строка: 1/113", "Позиция: 1", and "Character: 38 (0x26)".

Рисунок А.1 – Управляющий файл namelist.input



```
&geogrid
parent_id          = 1,
parent_grid_ratio  = 1,
i_parent_start     = 1,
j_parent_start     = 1,
e_we              = 200,
e_sn              = 150,
geog_data_res     = '30s',
dx = 3000,
dy = 3000,
map_proj          = 'polar',
ref_lat          = 44.6,
ref_lon          = 33.5,
truelat1         = 44.6,
truelat2         = 90,
stand_lon        = 33.5,
geog_data_path   = '/data2/geob',
opt_geogrid_tbl_path = '/data0/home/420/Nastya/krym/',
ref_x            = 100.0,
ref_y            = 75.0,
/
```

Рисунок А.1 – Управляющий файл namelist.wps

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

```
'reinit'  
c.1="q2"  
'open 01102020.ctl'  
'set grads off'  
tt=1  
ty=2020  
while(tt<6)  
  'set t 'tt  
  'set mpdraw on'  
  'set mpdset hires'  
  'set lon 29.5 37.5'  
  'set lat 42.5 46.8'  
  'run color.gs 10 23 1 -gxout shaded -var t2-273 -kind darkblue->dodgerblue-  
>(255,255,255)->plum->darkmagenta'  
  'd t2-273'  
  'q time'  
  time=subwrd(result,3)  
  'run cbar'  
  'SET CCOLOR 4'  
  'draw title Temperature, C ' time  
  'q w2xy 33.52 44.59 '  
  x2=subwrd(result,3)  
  y2=subwrd(result,6)  
  'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.25'  
  'printim pics/t2/'time'_t2_'tt'.gif white'  
  'c'  
  tt=tt+1  
endwhile  
tt=2  
while(tt<6)  
  'set t 'tt  
  'set mpdraw on'  
  'set mpdset hires'  
  'set lon 29.5 37.5'  
  'set lat 42.5 46.8'  
  'run color.gs 2 45 2 -gxout shaded -var RAINC+RAINNC+RAINSH -kind blue-  
>aqva->lime->yellow->red'  
  'd RAINC+RAINNC+RAINSH'  
  'cbarn'  
  'q time'  
  time=subwrd(result,3)
```

```

'SET CCOLOR 4'
'draw title PRECIPITATION, mm ' time
'q w2xy 33.52 44.59 '
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.25'
'printim pics/R/'time'_R.gif white'
'c'
tt=tt+1
endwhile
tt=1
while(tt<6)
'set t 'tt
'set mpdraw on'
'set mpdset hires'
'set lon 29.5 37.5'
'set lat 42.5 46.8'
'set gxout vector'
* 'run color.gs -gxout shaded -var p -kind blue->aqua->lime->yellow->red'
'd skip(u10,10);v10'
'q time'
time=subwrd(result,3)
'SET CCOLOR 4'
'draw title WIND, m/s ' time
'q w2xy 33.52 44.59 '
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.25'
'printim pics/wind/'time'_wind_'tt'.gif white'
'c'
tt=tt+1
endwhile

```

Рисунок Б.1 – Скрипт для визуализации результатов прогноза температуры, осадков и ветра

```

function main(args)
d1=subwrd(args,1)
d2=subwrd(args,1)
c.1="q2"
'open 'd1'102020.ctl'
'open 'd2'112020.ctl'
'set grads off'
tt=1
ty=2020
while(tt<6)
  'set t 'tt
  'set mpdraw on'
  'set mpdset hires'
  'set lon 29.5 37.5'
  'set lat 42.5 46.8'
  'run color.gs -6 3 1 -gxout shaded -var t2.1(t=5)-t2.2(t=1) -kind whitesmoke-
>darkblue'
  'd t2.1(t=5)-t2.2(t=1)'
  'q time'
  time=subwrd(result,3)
  'run cbar'
  'SET CCOLOR 4'
  'draw title Temperature, C ' time
  'q w2xy 33.52 44.59 '
  x2=subwrd(result,3)
  y2=subwrd(result,6)
  'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.25'
  'printim er(t)/'time'_t2.gif white'
  'c'
  tt=tt+1
endwhile
'reinit'

```

Рисунок Б.2 – Скрипт для визуализации ошибки прогноза для температуры воздуха

```

function main(args)
d1=subwrd(args,1)
d2=subwrd(args,1)
c.1="q2"
'open 'd1'102020.ctl'
'open 'd2'112020.ctl'
'set grads off'
tt=1
ty=2020
while(tt<6)
  'set t 'tt
  'set mpdraw on'
  'set mpdset hires'
  'set lon 29.5 37.5'
  'set lat 42.5 46.8'
  'run color.gs -gxout shaded -var q2.1(t=5)-q2.2(t=1) -kind whitesmoke-
>darkblue'
  'd q2.1(t=5)-q2.2(t=1)'
  'q time'
  time=subwrd(result,3)
  'run cbar'
  'SET CCOLOR 4'
  'draw title Humidity, kg/kg ' time
  'q w2xy 33.52 44.59 '
  x2=subwrd(result,3)
  y2=subwrd(result,6)
  'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.25'
  'printim er(q)'/time'_q2.gif white'
  'c'
  tt=tt+1
endwhile
'reinit'

```

Рисунок Б.3 – Скрипт для визуализации ошибки прогноза для массовой доли водяного пара

ПРИЛОЖЕНИЕ В

```
integer,parameter :: NX=199,NY=149,NZ=6,NT=5
real,dimension (NX,NY) :: XLAT,XLON
real,dimension (NX,NY,NT) ::
T2,Q2,U10,V10,T2f,Q2f,U10f,V10f,RAINC,RAINNC,RAINSH
real,dimension (NX,NY,NT) :: U,V,h
real,dimension (NX,NY,24) :: F24
real,dimension (NX,NY,34) :: F34
real,dimension (NX,NY) :: F1
real,dimension (NX,NY,4) :: F4
real M
integer ReclZap
character*15 name1,name2
!character*15,dimension (8) :: name1
!=(/'02102020(6).dat','10102020(6).dat','11102020(6).dat','14102020(6).dat','17102020(6).dat','18102020(6).dat','28102020(6).dat','30102020(6).dat'/)
!character*15,dimension (8) :: name2
!=(/'03102020.dat','11102020(6).dat','12102020(6).dat','15102020.dat','18102020(6).dat','19102020.dat','29102020.dat','01112020(6).dat'/)
ReclZap=NX*NY*84+NX*NY*24*29+NX*NY*34*2+NX*NY*4*4
iSEV=97 ; jSEV=67
open(15,file='FORECAST.dat')
write(15,'(a10,a11,3a10,a11,3a10)') 'data','Q2','T2','U10','V10','Q2f','T2f','U10f','V10f'
open(111,file='listPR.txt')
open(112,file='listFA.txt')
do while(.not.EOF(111))
  read(111,'(a15)') name1 ; write(*,*) name1
open(1,file=name1,form='unformatted',access='direct',convert='big_endian',recl=ReclZap)
```

```

do it=NT,NT ; !write(*,*) it
  read(1,rec=it)
(F24,i=1,3),(F1,i=1,4),F24,(F1,i=1,4),(F24,i=1,2),F1,(F24,i=1,8),XLAT,XLON,(F1,i
=1,2), &
(F34,i=1,2),(F24,i=1,5),(F1,i=1,3),(F24,i=1,3),Q2(:, :,it),T2(:, :,it),(F1,i=1,2),U10(:, :,it
), V10(:, :,it), &
(F24,i=1,6),(F1,i=1,3),(F4,i=1,4),(F1,i=1,27),RAINC(:, :,it),RAINNC(:, :,it),RAINSH(
(:, :,it)
  enddo
  close(1)
! do i=1,NX ; do j=1,NY
! if(XLAT(i,j)<44.4.and.XLAT(i,j)>44.3) then
!   if(XLON(i,j)<33.4.and.XLON(i,j)>33.3) then
!     iSEV=i; jSEV=j
!   endif
! endif
! enddo ; enddo
! write(*,*) iSEV,jSEV
  read(112,'(a15)') name2 ; write(*,*) name1,name2
open(1,file=name2,form='unformatted',access='direct',convert='big_endian',recl=Recl
Zap) !
  do it=1,1 ; !write(*,*) it
    read(1,rec=it)
(F24,i=1,3),(F1,i=1,4),F24,(F1,i=1,4),(F24,i=1,2),F1,(F24,i=1,8),XLAT,XLON,(F1,i
=1,2), &
      (F34,i=1,2),(F24,i=1,5),(F1,i=1,3),(F24,i=1,3), Q2f(:, :,it), T2f(:, :,it), (F1,i=1,2),
U10f(:, :,it), V10f(:, :,it)
    enddo
  close(1)

```

```
write(15,'(a10,f11.5,3f10.1,f11.5,6f10.1)')
name2(1:8),Q2(iSEV,jSEV,5),T2(iSEV,jSEV,5),U10(iSEV,jSEV,5),V10(iSEV,jSEV
,5), &
Q2f(iSEV,jSEV,1),T2f(iSEV,jSEV,1),U10f(iSEV,jSEV,1),V10f(iSEV,jSEV,1),RAI
NC(iSEV,jSEV,5),RAINNC(iSEV,jSEV,5),RAINSH(iSEV,jSEV,5)
enddo
close(1)
stop
end
```

Рисунок В.1 – Программа для обработки дистанционных данных