



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: «Использование модели WRF для прогноза экстремальных осадков в г. Сочи»

Исполнитель Дряпак Вероника Игоревна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук  
(ученая степень, ученое звание)

Топтунова Ольга Николаевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна  
(фамилия, имя, отчество)

« 5 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург  
2023

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| СОКРАЩЕНИЯ.....  | 3  |
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 5  |
| Глава 1. Подходы к краткосрочным прогнозам погоды .....                  | 7  |
| 1.1 Синоптические методы .....   | 7  |
| 1.1.1 Прогноз морозящих осадков.....                                     | 8  |
| 1.1.2 Прогноз обложных осадков .....                                     | 9  |
| 1.1.3 Прогноз ливневых осадков, гроз и града.....                        | 12 |
| 1.2 Физико-статистические методы .....                                   | 15 |
| 1.3 Гидродинамические методы .....                                       | 17 |
| Глава 2. Описание модели WRF .....                                       | 22 |
| 2.1 Общая характеристика WRF .....                                       | 22 |
| 2.2 Элементы программной системы WRF .....                               | 23 |
| 2.2.1 Структура программной системы WRF.....                             | 24 |
| 2.3 Параметризация физических процессов в модели .....                   | 32 |
| Глава 3 Составление краткосрочного прогноза осадков .....                | 39 |
| 3.1 Модель краткосрочных прогнозов на урбанизированных территориях ..... | 40 |
| 3.2 Краткое климатическое описание города Сочи.....                      | 42 |
| 3.3 Адаптация модели для Сочи .....                                      | 44 |
| 3.3.1 Отбор данных для работы с моделью .....                            | 49 |
| 3.4 Результаты моделирования .....                                       | 51 |
| 3.5 Верификация модели .....   | 53 |
| 3.6 Синоптический анализ .....   | 66 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 67 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....                                   | 68 |
| Приложение А .....   | 75 |
| Приложение Б .....   | 78 |
| Приложение В.....  | 82 |
| Приложение Г .....   | 84 |

## СОКРАЩЕНИЯ

|      |   |  |
|------|---|--|
| ACM2 | – | Assymetric convective model              |
| ARPS | – | Advanced Regional Prediction System      |
| ARW  | – | Advanced Research WRF                    |
| As   | – | высоко-слоистая облачность               |
| CAM  | – | Community Atmosphere Model               |
| Cb   | – | кучево-дождевая облачность               |
| Cu   | – | кучевая облачность                       |
| Eta  | – | Event Tree Analysis                      |
| GFDL | – | Geophysical Fluid Dynamics Laboratory    |
| GFS  | – | Global Forecast System                   |
| GRIB | – | GRIdded Binary                           |
| LM   | – | Lokal Model                              |
| MRF  | – | Medium Range Forecast                    |
| MYJ  | – | Mellor-Yamada-Janjic                     |
| NAM  | – | North American Mesoscale                 |
| NCAR | – | National Center for Atmospheric Research |
| NMC  | – | National Meteorological Center           |
| NMM  | – | Nonhydrostatic Mesoscale Model           |
| Ns   | – | слоисто-дождевая облачность              |
| RAMS | – | Regional Atmospheric Modeling System     |
| RRTM | – | Rapid Radiative Transfer Model           |
| RUC  | – | Rapid Update Cycle                       |
| Sc   | – | слоисто-кучевая облачность;              |
| St   | – | слоистая облачность                      |
| UM   | – | Unified Model                            |
| WPS  | – | WRF Preprocessing System                 |
| WRF  | – | Weather Research and Forecasting         |
| WSF  | – | WRF Software Framework                   |

WSM – WRF Single-Moment  
YSU – Yonsei State University

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях многие отрасли экономики, такие как сельское хозяйство, авиация и транспорт, сильно зависят от погодных условий, в том числе от количества осадков, особенно их экстремальных значений.

Осадки — вода в жидком или состоянии, которая выпадает из облаков на поверхность [1]. Экстремальные осадки — это колебания в количестве выпавших осадков, которые значительно отличаются от средних показателей для данного региона и времени года, и могут нанести серьезный ущерб жизни и имуществу. Это может быть как чрезмерный дождь или снегопад, так и засуха. В данной работе рассматривались экстремально сильные осадки [2].

Прогнозирование экстремальных осадков важно для защиты жизни и имущества людей от различных стихийных бедствий, таких как наводнения, оползни, затопления дорог и мостов, срывы урожая и т.п. Это помогает государству, коммунальным службам и потребителям прогнозов принимать меры для минимизации ущерба и обеспечения безопасности населения [1]. Также прогнозирование экстремальных осадков может быть полезным для планирования сельскохозяйственных работ, строительства инфраструктуры, а также для управления водными ресурсами и регулирования уровня воды в реках и озерах. Прогноз осадков для военной и гражданской авиации является важной задачей, которая помогает обеспечить безопасность полетов. Информация об экстремальных осадках является важным аспектом деятельности военных сил, поскольку это позволяет им принимать решения о выполнении различных задач и операций [3].

Экстремальные осадки имеют очень разрушительную силу. Например, только из-за ливня 22–23 июля 2022 года по подсчетам

РосБизнесКонсалтинг Краснодар в пресс-службе мэрии города Сочи экономический ущерб составил 675,9 млн рублей, что составило почти 15% от доходов города за месяц 2022 года. А подобные экстремальные значения осадков в г. Сочи наблюдаются достаточно часто. Сложность в прогнозировании дополнительно носит рельеф местности, наличие гор и моря. Исходя из всего вышесказанного вытекает *актуальность* работы. *Целью* данного исследования является создание системы гидродинамического моделирования для города Сочи и ее тестирование.

Для этого в ходе работы были решены следующие задачи:

1. Отбор архивных случаев с наибольшим количеством осадков за последние 5 лет;
2. Подготовка начальных данных для гидродинамического прогноза;
3. Адаптация модели к исследуемой территории (подбор оптимального шага для материнской и вложенной сетки, разрешение орографии и т.п.);
4. Постпроцессинг;
5. Оценка чувствительности результатов модели к различным параметризациям;
6. Верификация результатов;
7. Синоптический анализ ситуаций, приводящих к выпадению экстремальных сумм осадков.

Объектом исследования являются экстремально сильные осадки. Предметом – качество их воспроизведения моделью WRF при различных параметризациях. Теоретическая часть выпускной квалификационной работы была составлена при помощи отечественной и зарубежной литературы, статей, учебников и наставлений по данному вопросу.

## Глава 1. Подходы к краткосрочным прогнозам погоды

Краткосрочный прогноз погоды — это прогноз, который охватывает период от 12 до 72 ч.

Для составления краткосрочного прогноза погоды используются несколько методов, включая:

1. Анализ наблюдений за погодой в реальном времени. Этот метод использует данные о скорости и направлении ветра, температуре, влажности, облачности и т. д. для оценки изменений погоды в ближайшее время.
2. Использование радаров. Радары могут обнаруживать во времени и пространстве изменения ветра и осадков, что позволяет определить грозы, штормы и сильный ветер.
3. Моделирование погоды. Этот метод использует компьютерные модели для прогнозирования погоды в ближайшее время. Точность такого метода зависит в основном от использованных параметризаций, а также методов ассимиляции данных наблюдений.

Все эти методы используются в комбинации для составления краткосрочного прогноза погоды.

### 1.1 Синоптические методы

Синоптические методы — это методы прогнозирования погоды, основанные на анализе и интерпретации метеорологических данных, полученных от метеорологических станций, систем наблюдений и спутников.

Они могут основываться на математических моделях и приближениях физических процессов, происходящих в атмосфере Земли, а также быть физико-статистическими.

Синоптики анализируют изменения давления, температуры, влажности, скорости и направления ветра, облачности, осадков и других параметров для прогнозирования погоды на краткосрочный и среднесрочный период. Точность такого прогноза находится в зависимости от густоты метеостанций и свежести метеоданных [4, 5].

### 1.1.1 Прогноз морозящих осадков

Морозящие осадки — это небольшие капли воды, которые выпадают из слоистой (St) или слоисто-кучевой (Sc) облачности и оставляют на поверхности предметов небольшую влажность. Это может быть дождь, мелкий снег, морось. Они выпадают в форме мелких снежных зерен или мелких капель дождя. Данный тип осадков характерен для тёплых воздушных масс (устойчивая стратификация) [4, 5, 6].

Выпадение данного типа осадков обусловлено неоднородностью размеров капель в облаке, причём более крупные капли, появляются вследствие коагуляции мелких капель.

Морозящие осадки больше всего образуются в водяных облаках, поэтому они регистрируются, когда верхняя граница облаков не достигает температуры кристаллизации, в то время как у поверхности земли температура должна оставлять около 0 °С [5, 6].

Чаще всего морось наблюдается в теплых секторах углубляющихся циклонов в холодное время года, когда отмечается перенос влажного теплого воздуха с моря на сушу. Реже же морозящие осадки могут



наблюдаться в образовавшихся в морской воздушной массе антициклонах (чаще на их периферии) [4].

Также морозящие осадки могут выпадать при пасмурной погоде, когда воздух насыщен влагой, но не хватает энергии для образования снега или дождя. Также, морозящие осадки могут выпадать при мелкой мороси и тумане, когда воздушные массы достигают точки росы. Места, где часто выпадают морозящие осадки, зависят от географического положения и климатических условий.

Прогнозирование морозящих осадков осуществляется следующим образом: с учётом эволюции облачности прогнозируется перемещение уже имеющихся зон осадков по изогипсам с карты абсолютной топографии  $AT_{850}$ . Морось может быть прогнозирована, если ожидается интенсивная адвекция достаточно тёплого и влажного воздуха. Кроме того, метеорологи могут использовать данные со спутников, радаров и других инструментов для более точного прогнозирования местоположения и интенсивности данных осадков [4].

### 1.1.2 Прогноз обложных осадков

Обложные осадки чаще всего образуются из слоисто-дождевой облачности (Ns), а реже из высоко-кучевых (As). Данные осадки могут принимать вид обычных снежных хлопьев и снежинок или дождя из капель диаметром больше 0,5 мм. В период зимних оттепелей весной и осенью осадки могут быть как в жидкой фазе (дождь), так и в твердой (снег). Возникновение обложных осадков связано с упорядоченным восходящим движением воздуха, которое охватывает большую толщину атмосферы. Поэтому данные осадки особенно часто наблюдаются в ложбинах и циклонах, то есть в области медленных и тёплых движущихся холодных фронтов (второго рода) и окклюзиях. Части фронта, находящаяся в области

выраженной циркуляции, особенно вблизи центральной части циклона, имеют наибольшую ширину зоны фронтальных осадков. При росте влажности воздушной массы и величины вертикальной скорости интенсивность осадков увеличивается и наоборот [5, 7].

Поэтому точность прогноза перемещения фронтов влияет на успешность прогнозирования облачных осадков. Зоны обложных осадков связаны с адвекцией теплого воздуха, так как они часто совпадают с районами наибольшего падения давления у земли. Иногда из подынверсионных слоисто-кучевых (Sc) и слоистых (St) облаков образуется область внутримассовых осадков, которая присоединяется к зоне фронтальных осадков, естественно, в таких случаях зона осадков существенно увеличивается. Как правило, слоистая и слоисто-кучевая облачность является водной и не дает осадков, осадки чаще всего вызваны кристаллами во фронтальной области, которые выпадают из более высоких облаков, таких как пересто-слоистые (Cs) и высоко-слоистые (As) [4].

Не связанные с фронтами осадки часто наблюдаются в холодное время года, обычно они встречаются в антициклоне. Для данного типа осадков характерны слоистые и слоисто-кучевые облака в зоне температур от  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже [5, 7].

В период зимних оттепелей весной и осенью осадки могут быть как жидкие (дождь), так и твёрдые (снег). Фазовое состояние данных осадков зависит от того, какая температура у поверхности земли и на какой высоте располагается изотерма  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  [5].

Прогноз обложных осадков основывается на изучении атмосферных условий в районе места их возникновения. Для этого используются данные метеорологических станций, спутниковых наблюдений, а также математические модели.

Для прогноза обложных осадков необходимо учитывать такие факторы, как давление (включая барическую тенденцию), скорость ветра, температуру воздуха и поверхности, влажность воздуха, наличие и характер облачности, рельеф местности. На основе этих данных составляется прогноз.

Прогноз обложных осадков (внутримассовых и фронтальных) разрабатывается следующим образом:

- Прогнозируется образование, перемещение и эволюция облаков, из которых могут выпадать обложные осадки, особенно фронтальных систем облаков;
- Прогнозируется перемещение уже существующей зоны обложных осадков одновременно с прогнозом перемещения атмосферного фронта и циклонном, с которым эта система связана. Для этого применяют правила ведущего потока, используя прогностическую фактическую карты абсолютной топографии  $AT_{700}$ ;
- В соответствии с прогнозом эволюции циклона и фронта, прогнозирует эволюцию зоны осадков.

Также существуют дополнительные факторы, которые нужно учитывать при составлении прогноза, способствующие или препятствующие выпадению обложных осадков:

- высота верхней границы системы дождевых облаков  $As - Ns$ , Толщина слоя облаков и положение изотермы  $T = -10$  °C. Так как выпадение осадков наиболее вероятно, если данная изотерма будет расположена внутри системы облаков. Осадки же наиболее вероятны при толщине слоя облаков более 2 км;
- знак и величина вертикальной составляющей скорости. Нисходящие движения воздуха препятствуют выпадению осадков, восходящие - способствуют;

- знак и величина объективных изменений, влажности и температуры. Положение зоны обложных осадков в общем совпадает с положением зоны наиболее интенсивной адвекции тепла и влаги перед теплым фронтом;
- неоднородность подстилающей поверхности. Даже относительно небольших возвышенности с наветренной стороны обложные осадки усиливаются [7].

### 1.1.3 Прогноз ливневых осадков, гроз и града

Ливневые осадки — внезапные осадки большой интенсивности, но малой продолжительности, которые образуются из кучево-дождевых облаков (Cb), кучевых облаков (Cu) динамического происхождения при развитой турбулентности. Данный тип осадков выпадает в виде крупных капель дождя или хлопья снега, иногда это может быть снежная крупа или град [7].

Данные осадки обычно образуются в результате высокой влажности воздуха и резкого охлаждения, вызванного конвекцией, например, в результате фронтального столкновения двух различных масс воздуха.

Ливневые осадки и грозы, как правило, отмечаются на фронтах, особенно на холодных и холодных фронтах окклюзии, на перифериях малоподвижных антициклонов, слабовыраженных и заполняющихся циклонах барических седловинах и в малоградиентном поле давления [5, 7].

Для возникновения ливневых осадков и гроз благоприятными условиями считаются:

- высокое влагосодержание воздуха во всей толще тропосферы;
- высокая относительная влажность воздуха в поверхности земли и на высотах;

- значительная неустойчивость воздушной массы;
- большая вертикальная протяженность кучево-дождевой облачности. В умеренных широтах ее вертикальная граница достигает уровня температуры примерно  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже, высота конвекции достигает высоты 6-7 км, а мощность превышает 4 км;
- изотерма  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , рядом с которой находится уровень кристаллизации, располагается достаточно низко;
- неоднородность подстилающей поверхности [7].

Ливневые осадки на фронтах прогнозируют одновременно с прогнозом перемещения самой линии фронта, вносятся поправки, которые связаны с эволюцией фронта, суточным ходом осадков и облаков, влиянием орографии, других местных особенностей района.

Некоторые факторы осложняют прогноз внутримассовых ливневых осадков:

- локальный характер выпадения осадков. В пунктах, удаленных друг от друга всего на нескольких километрах, характер погоды может довольно сильно отличаться;
- облака, из которых ожидаются осадки, нередко еще не существуют на момент составления прогноза;
- неточности прогноза, стратификация атмосферы.

Внутримассовые ливневые осадки сильно зависят от местных условий. Они могут прекращаться вечером и возобновляться на следующий день при сохранении неустойчивости воздушной массы. Для прогнозирования вероятности выпадения ливневых осадков дается прогноз распределения по вертикали температуры и влажности воздуха. Синоптическая обстановка определяет комплекс факторов, по которым рассчитываются прогнозируемые величины, на его основании

устанавливается возможность развития конвекции кучевой облачности, ливней, гроз и града.

Метеорологические локаторы используются для прогнозов с малой заблаговременностью для определения процессов, происходящих в облаке, и направления перемещения самого облака.

Град — это форма атмосферных осадков, которая представляет собой твердые зерна льда, которые образуются в облаках грозового типа, где воздушные потоки поднимаются и опускаются между верхними и нижними слоями атмосферы. Град обычно выглядит как мелкий ледяной горошек диаметром до нескольких миллиметров, но может быть и крупным, достигая диаметра в несколько сантиметров. Град образуется в теплый период года при сильной развитой теплой конвекции. Из фронтально кучево-дождевой облачности град выпадает очень интенсивно. В кучево-дождевом облаке есть зона аккумуляции, где накапливаются крупные облачные элементы. Это зона находится над уровнем максимальной скорости восходящих потоков приблизительно в середине облака, поскольку скорость поднимающихся потоков увеличивается с высотой, достигает пика примерно в середине его части и затем убывает к вершине.

Град образуется при следующих условиях:

- вершина облака располагается выше уровня кристаллизации и имеет температуру ниже  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- наибольшая скорость восходящих потоков составляет примерно 10 м/с и больше и имеет расположение выше уровня нулевой изотермы [5].

Для определения начальной стадии образования града также используются наблюдения с радиолокаторов. Для создания более точного прогноза используются компьютерные модели, которые учитывают множество факторов, связанных с атмосферой. Модели погоды имеют

огромный объем данных, включая результаты зондирования атмосферы, наблюдения, данные с радаров и спутников [5].

Также для создания прогноза погоды могут использоваться специальные алгоритмы, которые вычисляют вероятность возникновения ливневых осадков, гроз и града, а также местоположение и время их появления. Все эти данные собираются и анализируются синоптиками.

## 1.2 Физико-статистические методы

Физико-статистические методы прогноза погоды – это математические методы, основанные на статистических данных, получаемых из наблюдений за изменением погодных условий, и на основе физических моделей атмосферы. Они базируются на анализе статистической информации о погодных условиях за определенный период времени и на использовании физических законов, описывающих движение атмосферных масс, для прогнозирования будущих погодных условий [4].

Физико-статистические методы прогноза погоды могут включать в себя такие методы, как регрессионный анализ, методы спектрального анализа, временных рядов, кластерный анализ, методы парной регрессии, и другие. Они позволяют определять, какие особенности погоды имеют наибольшее влияние на будущие изменения и какова вероятность каждого сценария развития погоды.

Физико-статистические методы прогноза погоды используются в большинстве современных метеорологических прогностических систем для повышения точности и достоверности прогнозов. Однако они также имеют свои ограничения, так как они не могут учитывать сложные атмосферные процессы, такие как перемещение циклонов и антициклонов, которые играют ключевую роль в формировании погодных условий [4].

Данные методы, основанные на характеристиках атмосферных процессов в прошедшем и настоящем времени, связаны с характеристиками атмосферных процессов в будущем. Для связи метеорологических величин с явлениями в прошедшем в будущем создается физическая модель процесса. После этого методом экспертного оценивания происходит изучение связи между характеристиками состояния атмосферы в прошедшем и настоящем времени с прогнозируемыми характеристиками [4].

Чтобы определить характеристики реальной атмосферы в данном подходе используется физическая связь между исходным и последующим состоянием атмосферой, дается прогноз не состояния модели атмосферы, а состояние реальной атмосферы. Она характеризуется значением прогнозируемой величины или прогнозируемым явлением. Чтобы спрогнозировать выбранную метеовеличину на основании физики выбираются характеристики исходного состояния атмосферы, находится статистическая связь с данной метеовеличиной. Эта связь устанавливается при обработке архивного материала [4].

Получаемые по физико-статистическим методам прогнозы могут быть вероятностными (прогнозирование вероятности наличия или отсутствие метеохарактеристики) и категорическими (даётся градация метеовеличины или наиболее вероятная фаза явления). У физико-статистического метода также присутствует и недостатки. Требуется дальнейшее согласование при прогнозе какой-либо одной величины или явления. Обычно это делается при помощи экспертного оценивания. Также недостатком является обязательное наличие длительных рядов метеонаблюдений. Именно при этом условии можно получить устойчивые статистические связи исходных характеристик атмосферы с прогнозируемыми значениями метеовеличин.



Прогноз делается на независимом материале. Если использовать наблюдение за определенные часы суток, чтобы убрать влияние суточного хода, или за определенные дни, то можно устранить нестационарность. Но при этом уменьшается количество членов выборки, которая нужна для разработки метода, но она становится нерепрезентативной из-за нехватки объема выборки. Если увеличить её до несколько десятков лет, то это может привести к появлению векового хода метеовеличин, который довольно сложно учитывать [4].

Именно по этим причинам обычно учитываются лишь периодические колебания средних значений для соответствующего времени суток или календарных дат, но при этом выборки отклонений от этих значений будут считаться стационарными.

В итоге дается возможность расширить объем исходной выборки, то есть использовать данные за различные часы суток и дни года одновременно в значительной мере удовлетворив требования статистической стационарности рядов наблюдений [4].

### 1.3 Гидродинамические методы

При разработке гидродинамических методов используются уравнения гидродинамики для описания исходного состояния атмосферы, на основе которых строится физическая модель, основанная на гипотезах и описываемая системой уравнений. Такие модели используют систему уравнений Навье-Стокса для описания движения жидкости или газа, а также законы сохранения массы, импульса и энергии для моделирования различных физических процессов.

В данном случае между исходным и будущим состояниями атмосферы существует функциональная связь, что позволяет

гидродинамическому прогнозу быть категорическим, то есть для каждого исходного состояния модели соответствует только одно состояние в будущем в различных точках пространства.

Современные технологии позволяют использовать гидрометеорологические модели для прогнозирования погоды, включая температуру, давление, осадки, влажность, скорость и направление ветра и другие показатели. При этом эти модели имеют плюсы, такие как возможность более точного прогнозирования, комплексность и согласованность прогностических метеорологических полей [4].

Однако качество прогноза зависит от точности и адекватности модели, а также от ее количественного описания. Использование гидрометеорологических моделей для прогнозирования погоды широко распространено в настоящее время, и точность прогнозов с их помощью достаточно высока [4].

Как правило, гидродинамические модели создаются для различных территорий, что означает приближенный учет местных факторов и особенностей окружающей среды, воздействующих на формирование погодных явлений. Такие прогнозы не всегда точны и могут требовать дополнительной детализации по местоположению и времени. При использовании численных методов прогнозируются не локальные значения метеопараметров, а их усредненные показатели по расчетной координатной сетке [4, 8].

Некоторым потребителям прогноза погоды интересны экстремальные характеристики и резкие изменения погодных явлений, однако ограниченная пространственная точность модели ограничивает ее возможности [8].

Несмотря на популярность численных прогнозов, модели еще не являются идеальными, причем информация о начальных параметрах

текущей погоды не всегда точна и полна, что ведет к ограничениям в использовании численных методов [4, 8]. Кроме того, ошибки могут возникать на этапе ассимиляции (усвоении) данных, а также на этапе выбора параметризаций. Дело в том, что многие процессы, происходящие в атмосфере, не могут быть описаны в ЧПП напрямую, они параметризуются. Это же, помимо «вычислительной дороговизны» является еще одной, куда более существенной сложностью при переходе на более мелкую сетку. В этом случае некоторые из процессов уже становятся «видны» на сетке, а значит не могут быть параметризованы, однако и другого способа учета таких процессов в ЧПП пока не существует.

В численных моделях также могут наблюдаться систематические ошибки из-за того, что они описывают лишь основные механизмы образования погоды, что приводит к приближенному представлению физических процессов [4].

Многочисленные явления погоды, включая опасные, имеют местный характер и сложную природу. Полной автоматизации прогнозирования природы этих явлений достичь невозможно, поэтому они прогнозируются специалистами на метеостанциях, которые знают условия образования и развития этих явлений в конкретном регионе [8]. Кроме того, пространственно-временные масштабы атмосферных процессов зависят от заблаговременности прогноза и скорости воздушного переноса [8].

При подготовке краткосрочных и краткосрочных прогнозов необходимо учитывать специфику начальных данных, а также количественные и качественные различия в зависимости от заблаговременности, например несколько суток в краткосрочном прогнозе и несколько часов в краткосрочном [8].

Мезомасштабные процессы играют важную роль в краткосрочном прогнозировании и при их прогнозировании необходима детализированная

информационная база. Недостаточное количество детализированных данных приводит к фоновому прогнозу и снижению его информационной ценности [4, 8].

Некоторые погодные явления, такие как ливни и шквалы, имеют очень короткий период существования - от нескольких минут до нескольких десятков минут. Это затрудняет прогнозирование таких явлений с помощью численных моделей [4, 8].

Часто для прогнозирования текущей погоды и краткосрочных прогнозов используются спутниковые данные и данные с радиолокаторов, поскольку они могут быть более детальными, чем контактные наблюдения, так как они позволяют оценивать перемещения циклоны и отдельные зоны погодных явлений [4, 8].

#### *Классификация гидрометеорологических моделей*

Гидродинамические модели для прогнозирования погоды включают в себя атмосферные модели различных масштабов - мезомасштабные, региональные и модели общей циркуляции [9].

Модели глобальной циркуляции описывают процессы планетарного масштаба, и для их адекватного воспроизведения необходимы данные метеорологических наблюдений. Для этого используются прямые наблюдения с помощью сети наземных станций, метеозондов и самолетов, а также данные дистанционного зондирования, включая наземные радары, лидары и спутники [9].

Существуют различные гидродинамические модели глобальной циркуляции, такие как Unified Model (UM) метеослужбы Великобритании, Global Forecast System (GFS), разработанная в США, GME службы погоды Германии и другие [9].

Региональные модели рассматривают процессы в атмосфере ограниченного региона и используют результаты вычислений моделей глобальной циркуляции в качестве граничных условий. При этом моделировании возможно использование более мелкого шага сетки и учет более широкого спектра погодных процессов для рассмотрения. Это объясняется тем, что область моделирования меньше, чем в глобальных моделях. Если шаг сетки составляет несколько километров, то модель относится к мезомасштабным и может корректно описывать мезомасштабные процессы [9].

Некоторыми примерами мезомасштабных моделей являются ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational, разработанная во французской метеорологической службе, NAM (North American Mesoscale), Eta (Event Tree Analysis), ARPS (Advanced Regional Prediction System), RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), RUC (Rapid Update Cycle) - разработанные в США, а также немецкая модель LM (Lokal Model) [9].

Другой известной моделью является MM5 (Mesoscale Model 5), разработанная в Национальном центре атмосферных исследований National Center for Atmospheric Research (NCAR) США, которая широко применялась в различных странах в течение нескольких лет как для научных исследований, так и в практике метеорологического прогнозирования. Эта модель доступна для свободного распространения, что стало причиной её популярности [9].

## Глава 2. Описание модели WRF

На данный момент существует несколько гидродинамических моделей для составления краткосрочного прогноза, но среди них особенно заметна развивающаяся система моделирования WRF (Weather Research and Forecasting), созданной на базе MM5, Eta и других вышеупомянутых моделях. Для выполнения данной работы была выбрана именно WRF.

### 2.1 Общая характеристика WRF

WRF является мезомасштабной моделью с системой ассимиляции данных нового поколения. Разработка WRF осуществлялась более чем 150 организациями из США и других стран под руководством Национального центра атмосферных исследований (NCAR) [9, 10].

WRF широко используется научно-исследовательскими организациями и метеослужбами во многих странах. Кроме того, WRF — это гибкая программная система, которую можно изменять, и она находится в свободном доступе [10].

Основная цель разработки WRF заключается в улучшении качества прогноза мезомасштабных погодных явлений путём развития представлений о физических процессах в атмосфере [9, 10, 11].

Данная модель была создана для изучения метеорологических явлений в атмосфере среднего масштаба, включая системы осадков, и применяется на практике для численного прогноза погоды. Кроме этого, её можно применять для анализа распространения примесей в атмосфере, изучения взаимодействия океана и атмосферы, моделирования регионального климата и исследования параметризации физических

процессов в атмосфере. Модель также может использоваться для рассмотрения идеализированных случаев, которые будут интересны для теоретических исследований [10, 12].

## 2.2 Элементы программной системы WRF

Элементы программной системы WRF включают:

1. Динамическое ядро модели, которое определяет физические процессы, происходящие в атмосфере.
2. Набор схем параметризации, который описывает подробнее физические процессы, такие как турбулентность, излучение и облака.
3. Библиотеку физических констант, содержащую значения физических параметров, используемых в модели.
4. Набор данных топографии, который предоставляет информацию о рельефе земной поверхности.
5. Набор данных почвы, который содержит информацию о свойствах почвы, таких как влажность и температура.
6. Набор данных использования земли, который определяет тип использования земли на модельной области.
7. Набор данных инициализации, который содержит данные о начальных условиях моделирования, таких как температура, давление и скорость ветра.
8. Набор данных граничных условий, который обеспечивает данные о погодных условиях за пределами модельной области.
9. Интерфейс ввода-вывода, который управляет входными и выходными данными модели, включая сохранение результатов моделирования.
10. Менеджер задач, который распределяет задачи между процессорами при параллельном выполнении модели.

## 2.2.1 Структура программной системы WRF

WRF состоит из большого числа независимых компонентов, каждый из которых выполняет определенную задачу на различных этапах моделирования.

Основные элементы модели включают в себя программное обеспечение WRF Software Framework (WSF), а также внешние элементы, такие как

- Система подготовки исходных данных WRF Preprocessing System (WPS);
- система объективного анализа данных стандартных метеонаблюдений OBSGRID;
- различные инструменты визуализации и обработки данных WRF (пост-процессинг) [13].

Все они представлены на рисунке 2.1.

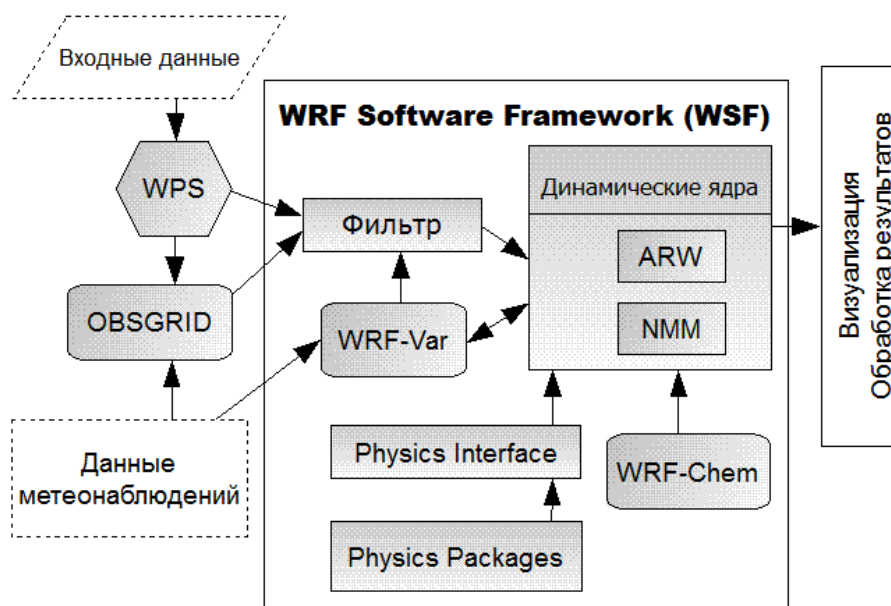


Рисунок 2.1 - Структура программной системы WRF



В WRF Software Framework входят ARW (Advanced Research WRF) и NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) в качестве динамических ядер, Physics Packages, включающие параметризацию расчета подсеточных процессов, а также Physics Interface для их взаимодействия с ядрами, модуль ассимиляции метеонаблюдений WRFDA и модель химического состава атмосферы WRF-Chem [13].

Также в данной модели присутствует WRF Software Framework. Эта система обладает возможностью обмена данными с другими программами и системами моделирования, такими как модель циркуляции океана и модель земной поверхности, при помощи Earth System Modeling Framework (ESMF), что позволяет создавать единое программное окружение. В WRF Software Framework поддерживается широкий спектр форматов данных [13].

На данный момент WRF поддерживает 5 форматов для ввода-вывода данных: GFS, двоичный, NetCDF, PHDFS, GRIB1 и GRIB2.

Формат GFS отображает поля метеопараметров, которые формируются в модели глобальной циркуляции, представляя данные многих переменных для всей земной поверхности [14].

Для всех задач моделирования рекомендуется использовать формат NetCDF (Network Common Data Form), который предназначен для работы с научными данными и широко применяется в различных областях исследований [14].

Метеорологическая информация достаточно объемна, поэтому формат GRIB (GRIdded Binary), утвержденный Всемирной метеорологической организацией (ВМО), обычно используется для передачи и хранения метеорологической информации, так как он обеспечивает значительное сжатие данных [14].

Динамическое ядро модели WRF включает программу инициализации и численного интегрирования модельной системы дифференциальных уравнений. Оно также формирует начальные и граничные условия для решения поставленной задачи [14].

На сегодняшний день WRF оснащена двумя динамическими ядрами: Advanced Research WRF и Nonhydrostatic Mesoscale Model, которые отличаются численными методами дифференциальных уравнений, вертикальными координатами и набором зависимых переменных [13, 14].

ARW и NMM — это две модели, которые работают независимо друг от друга, но имеют много общих элементов. В будущем планируется создать единую прогностическую систему, которая позволит выбирать различные динамические ядра (ARW или NMM) и общий набор параметризаций [15].

Ядро ARW было разработано в Национальном центре атмосферных исследований (NCAR) и решает задачи для ограниченной территории, используя декартову систему координат.

Система уравнений состоит из негидростатических уравнений для сжимаемой жидкости, а вертикальная координата основана на сигма-координате, следующей рельефу местности. Для дискретизации уравнений движения используется сетка Аракавы класса «С», а интегрирование по времени производится методами Рунге-Кутты третьего и второго порядка при применении метода расщепления (шаг интегрирования различен для быстрых и медленных процессов [12, 13].

В ARW прогностические переменные могут быть представлены в виде отклонения метеовеличин от своих значений в гидростатическом равновесии (температура, геопотенциал, давление), а также в виде компонент скорости в декартовой системе координат. В параметризациях физических процессов используются дополнительные переменные, такие как турбулентная кинетическая энергия, составляющие облачности в

различных фазах, отношения смеси для водяного пара, осадки, химические составляющие и примеси атмосферы [13, 14].

В ядре NMM используются уравнения для полностью сжимаемой жидкости, разделенные на составляющие, отвечающие за динамику в гидростатическом равновесии, и вклад негидростатической динамики. Дискретизация уравнений происходит на сетке Аракавы класса «Е», а интегрирование по времени выполняется с помощью метода Аламса-Башфорта. Для некоторых величин используется сочетание с неявным методом Кранка-Николсона, что позволяет обеспечить численную устойчивость. Также в ядре NMM используется гибридная вертикальная координата, которая включает в себя сигма-координату, следующую рельефу местности, до того уровня изобарической поверхности, который задан пользователем, после чего переходит к традиционной изобарической координате [14].

Для определения области моделирования используется система подготовки данных WPS, которая определяет прямоугольную область с помощью картографических проекций. В ARW имеется 4 типа проекций: коническая проекция Ламберта, полярная стереографическая проекция, проекция Меркатора и широтно-долготная проекция с возможностью поворота полюсов. Для глобального моделирования атмосферы используется широтно-долготная проекция, а каждый тип проекции имеет свой набор параметров. Например, для конической проекции Ламберта это две стандартные широты и центральная долгота [13].

В модели WRF имеется возможность использования вложенных сеток, где шаг сетки (в метрах или градусах) определяется в исходной области моделирования и влияет на точность результатов. Уменьшение шага сетки в 2 раза приводит к увеличению количества вычислений как минимум в 4 раза, потому выбор шага сетки зависит от желаемой точности и доступных вычислительных ресурсов [10, 13].

Использование вложенных сеток в моделировании позволяет осуществлять расчеты с более высоким разрешением в заданной области. Каждая вложенная сетка может включать в себя еще одну вложенную сетку, и их количество может быть значительным, главное - избегать перекрытия областей, имеющих разное количество уровней вложенности. Необходимо отметить, что количество уровней вертикальной координаты остается неизменным, независимо от шага по горизонтальной координате [13].

#### *Блок подготовки входных данных WPS*

Совокупность из трех программ является системой предварительной обработки данных. Именно в данном блоке подготавливаются входные данные для программы инициализации при расчетах по реальным начальным данным [13].

В самом блоке выполняются следующие перечисленные задачи:

1. Определяются области моделирования и расчетных сеток, а также географические и статистические переменные интерполируются в узлы сетки;
2. Осуществляется выборка данных из сводок GRIB, GRIB2, и также интерполируются наземные данные, например, данные о ландшафте, землепользовании или типе почвы в зоне моделирования;
3. Данные о погоде из других моделей интерполируются на домен исследования [15].

#### *Инициализация (WRFDA)*

Для формирования начальных и боковых граничных условий используется программа инициализации. Эти условия автоматически генерируются на основе входных данных, которые содержат параметры зон моделирования и поля всех необходимых метеорологических параметров.

Поля задаются в узлах расчетной сетки, которая формируется для каждой зоны моделирования на изобарических поверхностях [14, 16].

В программе инициализации выполняется интерполяция метеорологических параметров по вертикали для формирования поверхностей с постоянной вертикальной координатой (используются сигма или гибридная поверхности). Для достижения большей плотности уровней в приповерхностном слое атмосферы можно применять произвольное расстояние между соседними уровнями вертикальной координаты [16].

Технологии 3D-Var, 4D-Var (при наличии пакета WRFPLUS) и ансамблевого усвоения данных входят в пакет WRF Data Assimilation (WRF DA), который можно бесплатно скачать и использовать.

Блок трехмерного вариационного усвоения данных позволяет автоматически проводить ассимиляцию данных от метеостанций, локаторов и спутников [15].

Система WRF может функционировать независимо от использования алгоритмов усвоения дополнительных данных [15].

#### *Усвоение данных с помощью WRFDA-3DVAR*

В рамках модели WRF предусмотрено несколько способов ассимиляции данных, включая трехмерный вариационный анализ.

Трехмерный вариационный анализ – метод, который часто используют для обработки дополнительных данных измерений, не включенных в расчет при предварительном анализе. После выполнения 3DVAR производится формирование новых полей метеорологических параметров, соответствующих данным наблюдений, в начальный момент времени на модельной сетке [17].

Этот метод эффективен на территории многих зарубежных стран, но следует отметить, что при работе с метеоданными на территории России необходимо учитывать измерения, полученные на стандартных метеостанциях, которые не участвуют в международном обмене информацией [17].

WRFDA (Weather Research Forecast Data Assimilation) представляет собой программную реализацию метода трехмерного вариационного анализа [18].

Основным принципом данной методики является сведение к минимуму определенного математического функционала:

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}(y - H(x))^T R^{-1}(y - H(x)) \quad (2.1)$$

$x$  – векторное состояние атмосферы

$x^b$  – исходное состояние

$y$  – наблюдения

$H$  – оператор наблюдений

$B$  – матрица ковариаций ошибок модели

В системе WRF для расчета матрицы ошибок применяется метод NMC (National Meteorological Center). Для определения области и сезона матрица может быть вычислена на основе предыдущих прогнозов модели, а также может быть универсальной, основанной на прогнозах модели GFS. При работе с системой необходимо подобрать параметры, учитывающие важность различных ошибок, обнаруженных в наблюдениях [17].

Существует возможность использовать 16 различных типов данных при ассимиляции, включая измерения на метеостанциях, кораблях,

самолетах, данные от спутников, данные о скорости ветра, радиолокационные измерения и другие [17].

Кроме трехмерного вариационного анализа (3DVAR), для ассимиляции данных в модели WRF используются также четырехмерный вариационный анализ (4DVAR) и ансамблевое усвоение данных.

Современные гибридные схемы объединяют два подхода к ассимиляции данных - ансамблевое усвоение и вариационный алгоритм. Они создают матрицу ковариаций ошибок прогноза на основе ансамблей и используют ее в вариационном алгоритме [19].

Дополнительно была разработана методика ассимиляции данных, которая комбинирует вариационный и калмановский подходы. Этот метод основывается на доказательстве сходимости линейного фильтра к диффузионному процессу, что приводит к системе уравнений для оптимального фильтра, отличной от уравнений Калмана [19].

#### *Описание WRF - Chem модуля*

Модуль WRF-Chem позволяет учитывать наличие твердых аэрозольных частиц в воздушном слое. В рамках этой модели оцениваются выбросы, перенос, смешение и химическая трансформация газообразных примесей и аэрозолей, которые рассматриваются вместе с метеорологическими данными. Эта модель используется для анализа качества воздуха на региональном уровне, исследования полей и связи между облачностью и химическими процессами [20].

Для работы модуля WRF-Chem требуется дополнительный ввод данных, связанных с химическим блоком. Эти данные могут быть представлены либо как поля выбросов пыли, либо могут быть сгенерированы в рамках расчетного блока, используя поля сжигания биомассы, поля биогенных выбросов, фоновые поля GOCART, антропогенные выбросы, вулканические выбросы и т. д [20].

### *Система подготовки вывода модельной продукции*

Блоки диагностики присутствуют в ядрах ARW и NMM системы подготовки вывода модельной продукции. Они используются для расчета дополнительных параметров, необходимых для синоптических прогнозов. На выходе системы можно производить интерполяцию переменных с моделируемых уровней на изобарические поверхности или геометрические высоты. Продукция на выходе может быть представлена в формате GRIB, что позволяет распространять ее по линиям связи. Общее количество переменных, описывающих состояние атмосферы, подстилающей поверхности и почвы, составляет около 200. К ним также относятся гидрологические характеристики, такие как поверхностный и грунтовый сток [21].

### 2.3 Параметризация физических процессов в модели

В моделях атмосферы непрерывные метеорологические поля представляются в виде сетки с узлами, что приводит к игнорированию процессов микро- и мезомасштаба. Однако эти процессы влияют на крупномасштабные процессы и должны быть учтены, поэтому они параметризуются в модели [23].

#### *Параметризация подсеточной турбулентности*

В модели ARW можно задать расчет коэффициентов горизонтальной ( $K_h$ ) и вертикальной ( $K_v$ ) турбулентностей четырьмя способами.

Первый способ предусматривает задание постоянных  $K_h$  и  $K_v$  пользователем. Второй способ основан на расчете только горизонтальной деформации и использует замыкание первого порядка по Смагоринскому. Третий способ предполагает использование трехмерного замыкания по Смагоринскому. Четвертый способ основан на использовании



турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) и ее нахождении замыканием порядка 1,5 [10, 21].

Если включена параметризация пограничного слоя, то расчет  $K_v$  по приведенным выше алгоритмам блокируется. В таком случае для расчета  $K_v$  используется применяемая параметризация пограничного слоя [21].

В модели NMM расчет подлежит только коэффициенту горизонтальной турбулентности  $K_h$ , тогда как  $K_v$  вычисляется в параметризации пограничного слоя. Расчет  $K_h$  основан на пропорциональности  $K_h$  тензору деформации, где используется не сама деформация, а выражение, которое пропорционально ей, измененное добавлением члена ТКЭ [21].

#### *Параметризация микрофизических процессов*

Различные параметризации используются для учета гидрометеоров и микрофизических процессов в моделях ARW и NMM, применяемых одинаково.

1. Параметризация Кесслера. Схема для дождя без ледяных частиц. Обычно используется для изучения идеальных моделей облаков. Является одномоментной, поэтому решается исключительно для водности осадков. [11].
2. Параметризация Линн. Усложненная схема, где присутствуют пять классов гидрометеоров. Здесь уравнения решаются для водности осадков. Данная схема подходит для моделирования с высокой точностью по реальным данным [23].
3. Параметризация WSM3, WSM5, WSM6. Они основываются на трансформированных параметризациях Хоббса и Ратледжа для облачности и осадков в смешанной фазе. Разница между версиями в заданных параметрах замерзания осадков [21, 24]. Используется в данной работе.

4. Параметризация Ферьера. Схема использует прогностические процессы смешанной фазы. Прогностические уравнения решаются для общего влагосодержания и удельной влажности [21].
5. Параметризация Томпсона. Является параметризацией микрофизических процессов в облаках. Для прогноза использует несколько переменных: водяной пар, содержание льда и водность осадков и облаков, концентрация облачных кристаллов [21].
6. Параметризация Центра им. Годдарда (схема ансамбля конвективных облаков). Она включает в себя прогностическое уравнение для крупного града или крупы. Подходит для моделирования облачности [21, 25, 26].
7. Параметризация Моррисона. Является двумоментной, прогнозируется концентрация и отношение смеси, учитывает различные типы водных частиц. Достаточно точно представляет распределение частиц по размерам [21].

#### *Расчет радиационных потоков*

Для расчета коротковолновых и длинноволновых потоков используют 6 схем, по 3 на каждый поток. Для описания длинноволновой радиации используют схемы RRTM, GFDL, CAM. Для коротковолновой — схемы Дудхия, Eta GFDL, CAM NCAR [21, 27].

1. Схема RRTM (Rapid Radiative Transfer Model). Точная схема переноса быстрой радиации. Основана на использовании метода коррелированных коэффициентов поглощения [27].
2. Схема GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory). Рабочая старая многополосная радиационная схема Eta. Выбор спектрального разрешения и интервалов основан на калибровке по линейным расчетам [19, 28].
3. Схема CAM (Community Atmosphere Model). Спектральная схема, которая учитывает несколько малых газовых компонентов, также учитывает сеточную и подсеточную облачность [19, 29].

4. Схема Дудхия. Рассчитывает коротковолновую радиацию для облачного и безоблачного неба на основе интегрирования [30]. Используется в данной работе.
5. Схема Eta GFDL. Является многополосной схемой с учетом озона из климатических и облачных эффектов [28, 31].
6. Схема CAM NCAR. Спектральная схема, в которой учитываются оптические свойства некоторых видов аэрозолей и малых газов компонентов [21, 29].

#### *Параметризация пограничного слоя*

В данной работе рассмотрены всего 4 параметризации пограничного слоя: MRF, YSU, MYJ, ACM2.

1. Параметризация MRF (Medium Range Forecast). В данной схеме учитывается вклад крупных вихрей и рассчитывается коэффициент вертикального обмена для количества движений, поэтому она считается нелокальной [21].
2. Параметризация YSU (Yonsei State University). Также считается нелокальной, ее отличие от MRF является тем, что на верхней границе пограничного слоя добавлен слой вовлечения [21].
3. Параметризация Mellor-Yamada-Janjic (MYJ). Здесь используются уравнения турбулентной кинетической энергии, а в системе уравнений присутствуют лимиты на значения коэффициентов [21, 32].
4. Параметризация ACM2 (Assymmetric convective model). Она основана на конвективной диффузной модели и модели Блакадара. В ней достаточно точно описывается перенос метеовелечин в пограничном слое [21, 33].

#### *Параметризация приземного слоя*

Для расчета потоков количества движения (или напряжения  $\tau$ ), потоков влаги (или скрытого тепла  $E$ ) и доступного тепла  $H$  в приземном слое применяются различные подходы для определения соответствующих

коэффициентов обмена. Эти потоки  $\tau$ ,  $H$  и  $E$  используются не только в рамках параметризаций пограничного слоя, но также в схемах, связанных с подстилающей поверхностью и почвой [21].

В модели WRF могут быть использованы несколько параметризаций:

1. Схема подобия MM5 (Монина-Обухова). Она предполагает расчет коэффициентов обмена. С использованием функции устойчивости Паулсона (для количества движений и тепла). Прогнозирование в работе было сделано с использованием данной схемы [21].
2. Схема подобия Eta. Здесь так же применяют функции устойчивости Паулсона, но с изменениями. Например, для океана и суши был введен вязкий подслой, а потоки влаги и тепла рассчитываются над вязким слоем [21, 31, 34].
3. Схема подобия GFS. Здесь производится расчет скрытого тепла и потоков движения на поверхности, включая составляющие: транспирация почвы, испарение с растительности и почвы [21].
4. Схема подобия Плейма-Ксю. В схему включается квазиламинарный слой сопротивления, учитываются различия между химическими компонентами, потоками тепла и водяного пара [21].

#### *Параметризация процессов на поверхности и в почве*

Такие модели применяются только для суши и морского льда. Для создания этих моделей используется разнообразная информация, включая данные из моделей приземного слоя, радиационные потоки, осадки и их перенос, а также сведения о поверхности и верхнем слое почвы. Выходные параметры моделей — потоки тепла и влаги с поверхности, которые используются для определения граничных условий для расчёта вертикального переноса в пограничном слое. При этом не учитывается горизонтальный обмен в почве, так как модели являются одномерными [21].

Существуют основные модели, которые используются в WRF:

1. Пятислойная модель термической диффузии. Так как здесь производится только перенос тепла в почве, а процессы, относящиеся к растительности, не учитываются, то данная модель не представляет большого интереса для прогноза погоды [10, 21].
2. Унифицированная модель Noah. Эта модель основана на учете потенциального испарения, которое меняется в течение суток. Она использует многослойную структуру почвы, состоящую из одного слоя растительности и одного слоя снега. Для прогнозирования используются данные о температуре и влажности почвы, а также о количестве воды на растительности и поверхности снега [21, 29].
3. Модель RUC (Rapid Update Cycle). Модель RUC очень похожа на модель Noah, за исключением того, что в RUC учитываются процессы замерзания почвы. Шестислойная схема используется для представления температуры и влажности почвы до глубины 3 метра, а также для моделирования одного или двух уровней снега (в зависимости от его толщины) и физических характеристик замерзшей почвы [21, 35].
4. Модель Плейма-Ксю. Эта схема имеет два слоя возбуждения-восстановления, которые отвечают за контроль температуры и объемной влажности почвы. Поверхностные потоки влаги регулируются через процесс эвапотранспирации [21].

#### *Параметризация конвекции*

В моделях есть возможность либо игнорировать параметризацию конвекции, либо учитывать её. Существует несколько схем параметризации конвекции, таких как Беттса-Миллера-Янича, Кейна-Фрича, ансамбль Грела-Дэвени и Грела 3D [21, 36, 37].

1. Схема Беттса-Миллера-Янича. Данная схема параметризации основывается на упрощении уравнения притока тепла. Предполагается, что между вертикальной адвекцией и конвективным притоком существует баланс. Суть этой параметризации заключается в необходимости определения стандартных равновесных профилей [21].
2. Схема Кейна-Фрича (КФ). Она основана на рассмотрении единичного конвективного облака. Эта схема параметризации предполагает, что большая часть доступной изначально потенциальной энергии удаляется при помощи параметризации конвекции (примерно 90% от этой энергии) [21, 38].
3. Ансамбль Грела-Дэвени. В схеме используются различные гипотезы, связанные со статическим и динамическим контролем. Для задания внешних параметров применяется методика, которая основана на комбинации значений, полученных из разных источников, а также их возмущенных значений [21, 36, 37].
4. Ансамбль Грела 3D. В данной схеме можно увидеть некоторые общие черты со схемой Грела-Дэвиса. Также как и в схеме Грела-Дэвиса, эта схема предполагает, что состояние между компонентами ансамбля является квазиравновесным. Однако, отличием этой схемы является то, что она учитывает эффекты опускания вблизи кучевых облаков, что позволяет более точно описывать процессы конвекции и теплообмена в атмосфере [21, 36, 37].

## Глава 3 Составление краткосрочного прогноза осадков

Краткосрочный прогноз в метеорологии составляется на временной интервал от 12 до 72 ч. Для этого используются данные множества метеорологических наблюдений, включая информацию о температуре, давлении, ветре, осадках и других параметрах атмосферы.

Краткосрочные прогнозы для урбанизированных территорий требуют более точных данных и аналитических методов, так как свойства городской среды сильно влияют на погоду в конкретном месте.

Для составления краткосрочного прогноза метеорологи обращаются к моделям прогнозирования погоды, которые учитывают текущую ситуацию в атмосфере и моделируют ее изменения в ближайшее время.

Процесс составления краткосрочного прогноза включает следующие шаги:

1. Анализ данных о текущей погоде и метеорологических условиях на местности.
2. Использование информации об изменении атмосферных параметров в последние часы для прогнозирования изменения погоды в ближайшие минуты-часы.
3. Расчет прогноза при помощи компьютерных моделей.
4. Проверка и корректировка полученных результатов с учетом опыта метеорологов.

Краткосрочный прогноз позволяет метеорологам предупреждать о неблагоприятных погодных условиях, например, сильном ветре, грозах, ливнях, чтобы люди могли принимать меры для защиты себя и своей собственности.

Например, в зимний период дорожные службы должны вовремя получать информацию о прогнозируемых осадках, чтобы планировать работу снегоуборочных машин.

### 3.1 Модель краткосрочных прогнозов на урбанизированных территориях

Прогнозы погоды на урбанизированных территориях часто основываются на численных моделях, которые используются для моделирования погодных процессов в атмосфере. Отличительной особенностью моделей для урбанизированных территорий является учет воздействия городской среды на погоду. Эти факторы могут включать в себя архитектуру городских зданий, качество воздуха, транспортную инфраструктуру и другие. Однако, современные численные модели погоды могут учитывать множество параметров, чтобы достичь более точных прогнозов.

Основные шаги для создания численных моделей для урбанизированных территорий:

1. Изучение городской среды: анализ геометрии и свойств городской среды, таких как конструкции зданий, характер грунта и водных объектов, уличная сеть, плотность населения, скорость автомобильного движения и т. д. При этом учитываются также параметры, связанные с городским климатом, такие как микроклимат, температурный аномалии, восходы и закаты солнца и т. д.
2. Создание географической информационной системы: эксперты создают географическую информационную систему (ГИС), которая содержит информацию о различных параметрах городской среды, включая здания, улицы, зеленые насаждения, рельеф местности и т. д.



3. Создание численной модели: на основе географической информационной системы создается численная модель города, которая включает в себя математические уравнения, описывающие динамику атмосферы в границах города.
4. Калибровка модели: инженеры-метеорологи объединяют данные, полученные из средств наблюдения за погодой с численной моделью. Затем модель калибруется и проверяется на соответствие и точность.
5. Валидация: Проверка, насколько точны прогнозы погоды, созданные с помощью численных моделей. Валидация может производиться путем сопоставления прогнозов с реальной погодой, которая была измерена в городе или другой урбанизированной территории.
6. Усовершенствование моделей: Оптимизация моделей, включая расширение набора входных данных, модификацию алгоритмов, участие экспертов и других специалистов в улучшении результатов.

Основным преимуществом использования численных моделей является возможность достаточно точного прогнозирования метеорологических условий в городах с заблаговременностью в несколько дней. Это позволяет прогнозировать экстремальные ситуации, такие как сильные ветры, туманы, гололедицу, засухи или наводнения, и принимать соответствующие меры для предотвращения возможных последствий.

Таким образом, численные модели представляют собой мощный инструмент для прогнозирования погодных условий на урбанизированных территориях, который может быть использован не только метеорологами, но и специалистами, работающими в сферах градостроительства, экологии и транспорта.

### 3.2 Краткое климатическое описание города Сочи

Климат в Сочи умеренно-морской, благодаря чему в данном районе всегда тепло и влажно. Климатообразующими факторами в городе Сочи являются следующие:

1. Географическое положение: город расположен на побережье Черного моря, вблизи горных массивов Кавказа. Эта комбинация помогает создать умеренный климат с мягкой зимой и достаточно прохладным летом. Наличие горных массивов также создает благоприятные условия для развития природных ландшафтов.
2. Воздушные потоки: Сочи расположен на пересечении двух воздушных потоков - субтропического и умеренного. Это помогает создать мягкий и комфортный климат с круглогодичными осадками.
3. Морской бриз: наличие морского бриза является ключевым фактором в формировании умеренного климата Сочи. Благодаря этому также создаются комфортные условия, так как температура воздуха и воды примерно одинаковая.
4. Природные ландшафты: реки, горы, леса и море являются естественными регуляторами климата в Сочи. Они оказывают влияние на прогнозирование и предотвращение чрезвычайных ситуаций, таких как наводнения, оползни и лесные пожары.

#### *Температура*

Температурный режим в Сочи является умеренным и предполагает мягкую зиму и прохладное лето.

Сезон гроз и дождей длится с мая по октябрь. Зимой в Сочи достаточно мягко, средняя температура воздуха составляет около  $+9^{\circ}\text{C}$ , при этом минимальная температура достигает  $+2^{\circ}\text{C}$ , а максимальная - до  $+14^{\circ}\text{C}$ . Весной и осенью средняя температура воздуха стабильно держится на

отметке около  $+16^{\circ}\text{C}$ , но во время прохладных затяжных дождей она может снизиться до  $+5^{\circ}\text{C}$ .

Летом в Сочи достаточно тепло, средняя температура воздуха составляет около  $+24^{\circ}\text{C}$ . Редко бывает жарко, температура может достигать  $+30^{\circ}\text{C}$ , но терпимую влажность поддерживает регулярный морской бриз. Влажность воздуха в среднем за год составляет около 75 %, летом — 76—78 %, а зимой — 71—73 %.

Среднегодовая температура воды в Сочи —  $16,0^{\circ}\text{C}$ . Наиболее холодная вода в феврале и марте ( $8,7^{\circ}\text{C}$ ), наиболее тёплая — в августе ( $25,3^{\circ}\text{C}$ ). В августе температура воды может достигать  $29^{\circ}\text{C}$ , а на мелких участках возле берега наблюдается температура ещё выше.

#### *Атмосферные осадки*

В Сочи режим осадков схож с режимом осадков обычных зон субтропического климата, то есть сезон гроз и дождей длится с октября по январь выпадает большое количество осадков, максимум приходится на декабрь, а минимум осадков выпадает в июне.

Среднегодовая сумма осадков в Сочи — около 1644 мм (от 1016 мм в 1986 году до 2835 мм в 1888 году). В течение года среднее количество дней с осадками — около 170 (от 9 дней в августе до 19 дней в декабре). Самым дождливым месяцем был январь 1892 года, когда выпало 615 мм осадков (при норме 179 мм). Самым засушливым месяцем был октябрь 1907 года, тогда осадков не наблюдалось вообще. В зимние месяцы выпадает до 70% годового количество осадков, что означает, что в этот период довольно часто бывают дожди и грозы, максимум приходится на декабрь. За летние месяца количество осадков снижается. Но иногда могут быть сильные ливни. Минимум осадков выпадает в июне. Весной и осенью наиболее благоприятен климат, в этот период периодически возникают кратковременные дожди.

Наибольшее количество осадков выпадает в горных местностях, а в низинах города осадки менее интенсивны. В связи с этим, в городе иногда возникают проблемы с наводнениями.

### 3.3 Адаптация модели для Сочи

В данной работе оценены возможности использования мезомасштабной модели WRF для краткосрочного прогноза экстремальных осадков в городе Сочи.

Для расчетов в данной работе была использована модель WRF-Chem версии 4.0. Точность прогноза, основанного на моделировании атмосферных процессов и мелкомасштабных явлений, зависит от размера шага используемой сетки. Чем меньше шаг, тем больше мезомасштабных процессов учитывается, что приводит к более точному прогнозу.

Было решено использовать вложенную сетку при адаптации модели для города Сочи с целью составления краткосрочного прогноза погоды. Это позволило получить более высокое разрешение прогноза для исследуемого региона.

Характеристики материнской и вложенной сеток представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры используемых сеток

|                             | d01     | d02           |
|-----------------------------|---------|---------------|
| Размер области (км)         | 780x650 | 228,96x190,08 |
| Число узлов вдоль параллели | 120     | 106           |

|                             |                                     |           |
|-----------------------------|-------------------------------------|-----------|
| Число узлов вдоль меридиана | 100                                 | 88        |
| Шаг сетки (км)              | 6,5x6,5                             | 2,16x2,16 |
| Число уровней по вертикали  | 35                                  |           |
| Проекция                    | Полярная стереографическая проекция |           |

Выбранные вложенные сетки отличаются по количеству узлов, размеру области и шагу сетки, однако у них общее число уровней по вертикали — 35. Использование метода вложенных сеток неизбежно приводит к ошибкам, связанные с интерполяцией, если исходная сетка грубая, поэтому для минимизации ошибок рекомендуется использовать метод телескопизации. Однако применение вложенных сеток существенно увеличивает время расчета прогноза, поэтому оффлайн режим использования вложенных сеток предпочтительнее для оперативного прогнозирования. При оффлайн использовании вложенные сетки используются последовательно, а не одновременно.

В результате была получена область моделирования, указанная на рисунке 311.

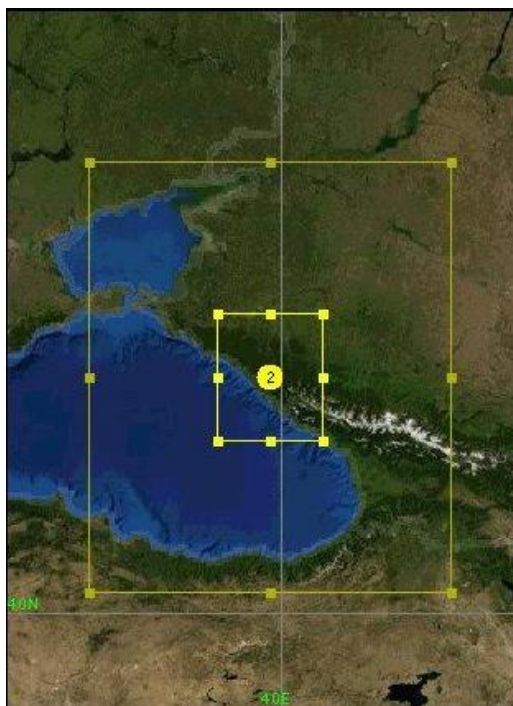


Рисунок 3.1 — Область моделирования

#### *Сетка 6,5х6,5 км*

Данная сетка является наибольшей, ее размеры по протяжённости составляют 780 км, а по вертикали — 650 км. Центром для обеих сеток служит город Сочи с координатами 43.585561 с.ш., 39.722829 в.д.

Описываемая сетка использует данные GFS (The Global Forecast System) с разрешением  $1^\circ$  для начальных и граничных условий, так как они обладают достаточно высокими показателями пространственного и временного разрешения и являются бесплатно распространяемыми.

Затем сетка используется для прогнозирования полей метеорологических величин и определения начальных и граничных условий для сетки 2,16х2,16 км.

### *Сетка 2,16x2,16км*

Данная сетка является наименьшей по охватываемой территории и имеет размеры по протяжённости 228,96 км, а по вертикали - 190,08 км.

Как уже упоминалось выше, использование сетки с шагом 6,5x6,5 км и часовым шагом требует задания начальных и граничных условий. Она позволяет получить прогноз для более конкретного района области.

На выходе работы модели были получены данные метеополей, из которых были составлены карты осадков для территории.

При адаптации модели было высчитано, что для данной работы подойдёт оптимальная область моделирования с шагом сетки 2,16x2,16 км для охвата всей территории города Сочи.

Следующим шагом был выбор нужных параметризаций для учета подсеточных процессов. Выбор был сделан исходя из описания WRF для умеренных широт. Ниже в виде таблице 3.3 приведен список используемых параметризаций.

Таблица 3.3 – Используемые параметризации

|   |               |
|---|---------------|
| Микрофизические процессы  | Схема WSM     |
| Потоки длинноволновой радиации                                    | Схема RRTM    |
| Потоки коротковолновой радиации                                   | Схема Дудхия  |
| Пограничный слой  | Схема MO      |
| Параметризация процессов в почве и на поверхности                 | Модель Noah   |
| Задание параметров подстилающей поверхности в городской застройке | WPS / geogrid |

|                              |                        |
|------------------------------|------------------------|
| Планетарный пограничный слой | Схема YSU              |
| Кучевая облачность           | Схема КФ, схема Тидтке |

#### *Опция микрофизики*

Схема простого льда WRF Single-Moment (WSM) 3-го класса WRF. Простая эффективная схема с обработкой льда и снега, подходящая для мезомасштабных размеров сетки.

#### *Опция длинноволнового излучения*

Схема RRTM. Модель быстрого переноса излучения. Точная схема с использованием справочных таблиц для повышения эффективности. Учитывает несколько диапазонов, остаточные газы и микрофизические виды. Эта схема была протестирована в WRF-NMM. Была использована в работе [27].

#### *Опция коротковолнового излучения*

Схема Дудхия. Простая нисходящая интеграция, обеспечивающая эффективное поглощение и рассеивание облаков и ясного неба. Эта схема была протестирована в WRF-NMM.

#### *Параметр поверхностного слоя*

Схема подобия Монины-Обухова. Основана на схеме подобия Монины-Обухова с вязким подслоем Карслона-Боланда и стандартных функциях подобия из справочных таблиц.

#### *Параметр процессов в почве и на поверхности*

Модель земной поверхности Noah. Унифицированная схема NCEP / NCAR / AFWA с температурой и влажностью почвы в четырех слоях, частичным снежным покровом и физикой мерзлого грунта. Эта схема была протестирована в WRF-NMM [26, 29].



### *Параметр пограничного слоя*

Схема Университета Йонсей (YSU) Параметризация планетарного пограничного слоя.

### *Параметр кучевой облачности*

Именно изменения данной параметризации исследовались в работе. Поэтому был сделан выбор расчетов с использованием трёх видов комбинации схем. Первый заключался в использовании схемы Кейна-Фрича на обеих сетках для дней с осадками и без. Второй — использование схемы Кейна-Фрича для сетки 6,5х6,5 км, а для малой сетки кучевая облачность не программировалась. Третий вариант заключался в использовании Схемы Тидтке для обеих сеток [39, 40].

Схема Кейна-Фрича (новое Eta) и Схема Тидтке. Схема подсети глубокого и мелкого залегания с использованием подхода массового потока с нисходящими потоками и временной шкалой удаления мыса [31, 39, 40].

Схема Тидтке. Схема конвекции Тидтке. Схема параметризации конвекции по методу Тидтке основана на отдельном описании конвективных и крупномасштабных процессов в атмосферном столбе. Основной характеристикой конвективного процесса является поток массы в облачной среде. Конвективные облака в данной схеме составляют единый ансамбль, который может иметь верхнюю границу на любом модельном уровне [39, 40].

#### 3.3.1 Отбор данных для работы с моделью

После адаптации модели и выбора нужной параметризации производился отбор данных с наибольшим количеством выпавших осадков в период с 1 января 2016 года по 31 декабря 2021 года. Данный объем

данных был выбран по причине того, чтобы использовать актуальные данные, потому что начиная с 2016 года повторение экстремальных осадков увеличилось.

Выборка производилась на сайте Специализированного массива для климатических исследований [aisori-m.meteo.ru](http://aisori-m.meteo.ru). Использовался фильтр по источнику данных (температура и осадки), разделам базы данных (сутки) и по станциям (37099 Сочи). В параметрах запроса были выбраны параметры: индекс ВМО, год, месяц, день, общий признак качества температуры (максимум, минимум, средняя), количество осадков.

В итоге был получен массив данных, состоящий из 2192 дней с выбранной станции. Массив был отсортирован сначала по максимальному значению осадков для выбора 10 дней с наибольшим количеством. Сформированные данные приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Дни с максимальными осадками

|       | год  | месяц | день | осадки, мм |
|-------|------|-------|------|------------|
| 37099 | 2016 | 12    | 11   | 67.9       |
| 37099 | 2017 | 12    | 25   | 83.5       |
| 37099 | 2018 | 7     | 15   | 80.5       |
| 37099 | 2018 | 9     | 16   | 69.7       |
| 37099 | 2018 | 12    | 26   | 61.1       |
| 37099 | 2019 | 8     | 17   | 106.9      |
| 37099 | 2019 | 12    | 1    | 62.7       |
| 37099 | 2021 | 7     | 5    | 85.8       |
| 37099 | 2021 | 9     | 25   | 72.0       |
| 37099 | 2021 | 10    | 4    | 61.7       |

Далее список был отсортирован заново для получения дней без осадков. Сухие дни отбирались для тех же годов, когда наблюдались

максимальные осадки. Так же был сформирована база данных для нужных дней, она представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Дни без осадков

|       | год  | месяц | день | осадки, мм |
|-------|------|-------|------|------------|
| 37099 | 2016 | 2     | 20   | 0.0        |
| 37099 | 2017 | 11    | 18   | 0.0        |
| 37099 | 2018 | 4     | 12   | 0.0        |
| 37099 | 2018 | 10    | 30   | 0.0        |
| 37099 | 2018 | 12    | 19   | 0.0        |
| 37099 | 2019 | 7     | 7    | 0.0        |
| 37099 | 2019 | 10    | 29   | 0.0        |
| 37099 | 2021 | 6     | 10   | 0.0        |
| 37099 | 2021 | 8     | 3    | 0.0        |
| 37099 | 2021 | 12    | 4    | 0.0        |

В итоге для работы с моделью WRF были отобраны 20 дней (10 дней с осадками и 10 без).

### 3.4 Результаты моделирования

После настройки модели для города Сочи и выбора используемых данных каждый день прогнозировался моделью WRF. Так как модели нужно время, чтобы приспособиться к начальным данным (этот эффект называют спинап модели), запуск производился за день до суток с максимальным количеством осадков. Например, в сумме за 11 декабря 2016 года наблюдался максимум осадков, тогда модель должна начать запуск с 10 декабря 2016 года 00ч по 12 декабря 2016 года 21ч. Прогноз давался на 72 часа. В итоге для прогноза дня с фактическим максимумом осадков в

выходных данных была информация по прогнозу осадков за 3 дня на каждые 3 часа.

Для получения выходных данных требовалось около 4 часов реального времени для каждого запуска. В итоге расчет данных моделью занял больше 160 часов реального времени (запуски проводились для двух параметризаций).

Запуски проходили следующим образом.

Сначала отрабатывался WRF Preprocessing System (**WPS**). WPS состоит из трех блоков:

`./geogrid.exe` – этот блок подготавливает географические данные, происходит определение параметров рабочих областей.

`./ungrib.exe` – распаковывает файлы данных из GRIB.

`./metgrid.exe` – подготавливает данные, интерполируя извлеченные на предыдущем шаге в узлы сетки, подготовленные на этапе работы `geogrid`.

`./real.exe` – подготавливает начальные и граничные условия для работы с реальными данными.

После этого происходит запуск модели `nohup ./wrf.exe &> log&`

После успешного выполнения программы динамического ядра сформированные выходные файлы были визуализированы при помощи программы *ARWpost (GrADS)*

Выходными данными являются массивы данных с заблаговременностью 30 часов. Эти данные представлены в виде метеополей осадков (Приложение А).

Дальнейшая работа по оптимизации работы данных происходила в `сdo` (извлечение различных видов осадков, автоматическая отрисовка и т.п.).

Примеры скриптов приведены в Приложении Б.

### 3.5 Верификация модели

После создания прогноза требуется проверить, насколько точны полученные метеоданные. Поэтому для этой цели в данной работе был использован расчет погрешности осадков.

Прогнозы осадков могут содержать определенную погрешность, которая может возникнуть из-за сложности атмосферных процессов, недостаточного количества данных или ошибок в расчетах моделей прогнозирования.

#### *Оценка ошибок*

Точность прогноза оценивалась по следующим характеристикам:

- средняя абсолютная ошибка прогноза:

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{\text{п}} - X_{\text{ф}}| \quad (3.1)$$

- средняя квадратическая ошибка прогноза:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{п}} - X_{\text{ф}})^2} \quad (3.2)$$

- средняя арифметическая (систематическая) ошибка:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{п}} - X_{\text{ф}}) \quad (3.3)$$

- $N$  – число элементов в выборке;  
 $X_{\text{п}}$  – прогностическое значение;  
 $X_{\text{ф}}$  – фактическое значение.

Оценка прогноза проводилась для десяти сухих дней и десяти дней с экстремальными осадками (в период 1 января 2016 года - 31 декабря 2021 года) для города Сочи.

Также для выбранных суток изменялась параметризация кучевых облаков. Для дней с осадками использовались параметры сеток 1/1, 1/0 и 6/6. Для дней без осадков — 1/1. Где первое значение является параметров для сетки 6,5х6,5, а второе — для сетки 2,16х2,16.

Число 1 в коде соответствует использованию схемы Кейна-Фрича. 0 — облачность не программировалась. 6 — использование схемы Тидтке.

Все рассчитанные ошибки приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Погрешности расчета осадков

|             | параметризация | $\delta$ | $\sigma$ | $\varepsilon$ |
|-------------|----------------|----------|----------|---------------|
| осадки      | 1/1            | 35,60    | 112,57   | 6,00          |
|             | 1/0            | 295,19   | 933,47   | 295,19        |
|             | 6/6            | 390,80   | 1235,82  | 390,80        |
| без осадков | 1/1            | 5,50     | 17,39    | 5,50          |

По полученным данным об ошибках можно сделать вывод, что для расчетов экстремальных осадков в городе Сочи лучшей может считаться модель с использованием на обеих сетках схемы Кейна-Фрича, так как точность прогноза из всех параметризаций у нее наивысшая.

### Оценка по количеству осадков

Для наглядности ниже представлены графики с прогнозированными и фактическими осадками для использованных схем.

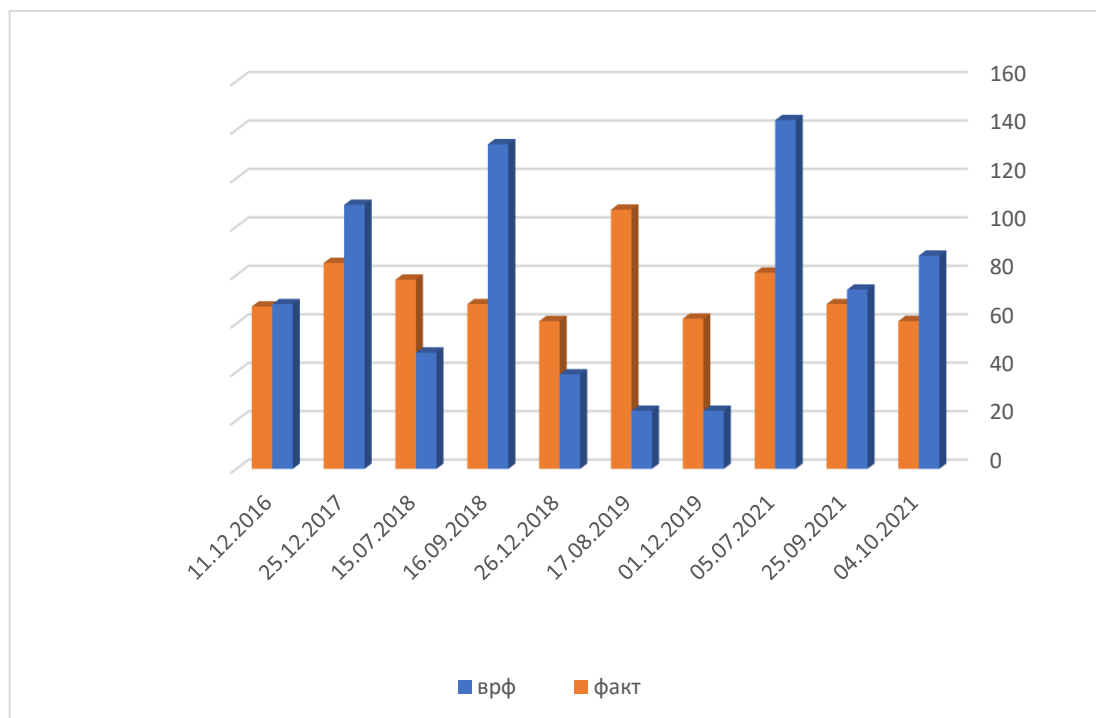


Рисунок 3.2 — Сравнение фактического значения и программированного количества осадков при использовании схемы Кейна-Фрича (1/1)

При использовании схемы Кейна-Фрича на сетках 6,5x6,5 км и 2,16x2,16 км модель относительно точно прогнозирует экстремальные осадки, значения которых в большей степени удовлетворяют запросы потребителей.

При изменении параметризации на рисунках 3.3 и 3.4 отмечается сильное завышение суммы суточных осадков, хотя прогноз в данных случаях оправдался на 100%, так как по результатам моделирования на все

10 дней прогнозируется очень сильный ливень (как и по фактическим данным). Но полученные данные нельзя использовать для потребителей, так как прогнозируемые осадки будут в десятки раз выше фактических, что приведет к чрезмерным мерам защиты и потери заказчиками огромных сумм денежных средств.

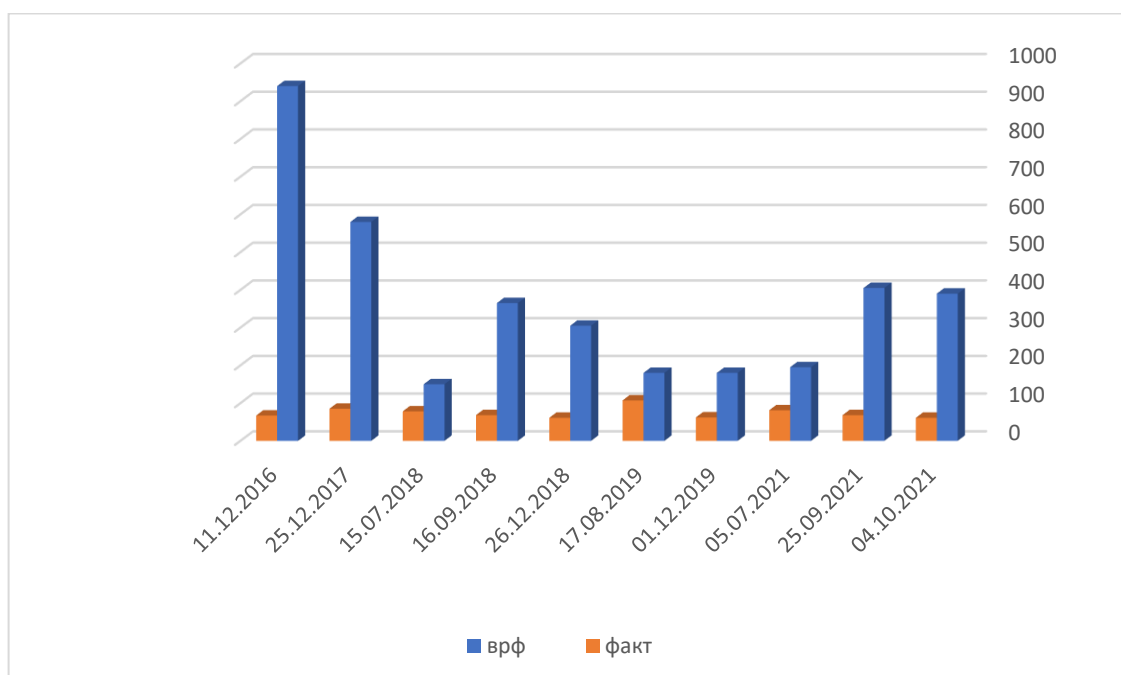


Рисунок 3.3 — Сравнение фактического значения и программированного количества осадков при использовании схемы Кейна-Фрича и отсутствия кучевой облачности (1/0)



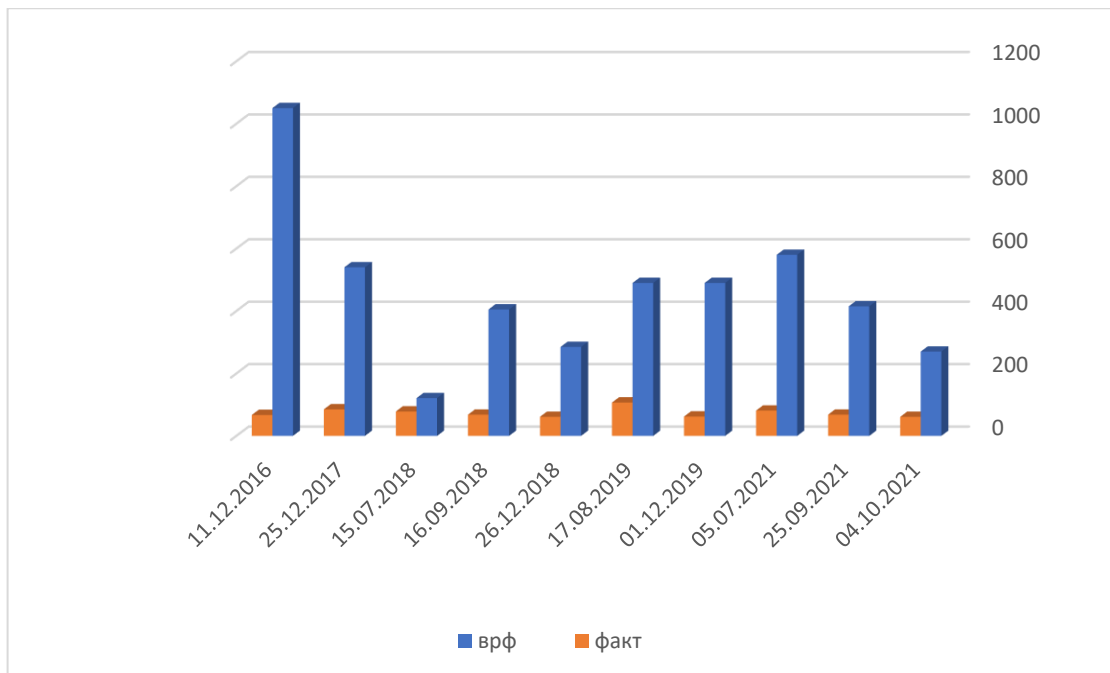


Рисунок 3.4 — Сравнение фактического значения и программированного количества осадков при использовании схемы Тидтке (6/6)

Для прогнозирования дней без осадков результат моделирования WRF в данном случае является оправданным, но в результате экспериментов выяснилось, что модель имеет систематическую ошибку примерно 0,5мм / 3ч и завышает количество осадков на данной территории.

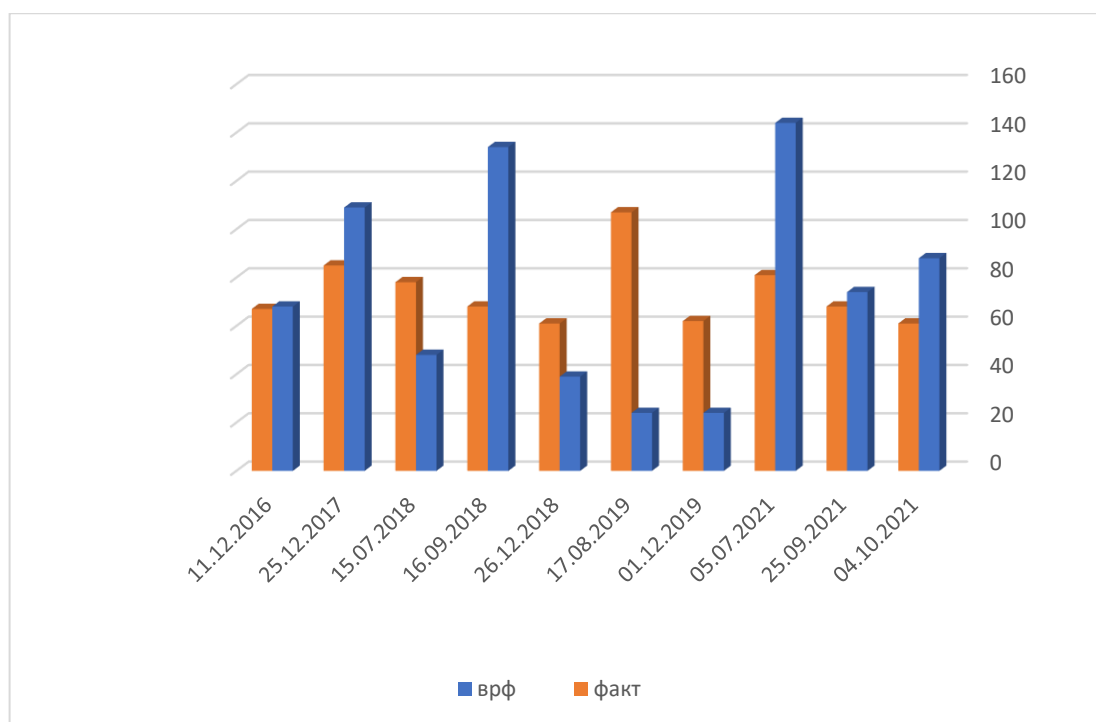


Рисунок 3.5 — Сравнение фактического значения и программированного количества осадков при использовании схемы Кейна-Фрича и отсутствия кучевой облачности при отсутствии осадков (1/1)

Так как по наставлению (Приложение Г) в селеопасных районах прогноз очень сильных осадков является оправдавшимся, если за 12 ч количество выпавших осадков составляло больше 24 мм, была составлена таблица 3.7 по оправданности прогнозов WRF для различных использованных схем на сетках.

Таблица 3.7 — Оправдываемость прогнозов WRF

|             | Параметризация | Оправдываемость, % |
|-------------|----------------|--------------------|
| осадки      | 1/1            | 70                 |
|             | 1/0            | 100                |
|             | 6/6            | 100                |
| без осадков | 1/1            | 100                |

Даже если при параметризациях 1/0 и 6/6 оправдываемость больше, то по данной методике оценке был сделан вывод для рекомендации, чтобы в рассматриваемой территории использовали параметризацию схемы Кейна-Фрича. Потому что в остальных случаях будет сильное завышение осадков.

#### *Оценка по градации осадков*

Также были проведены исследования количества прогнозируемых градаций осадков и повторения интенсивности.

После получения результатов прогнозирования количество осадков было разбито на несколько градаций для проверки того, какая параметризация даёт более точный прогноз.

По наставлению было определено, что фактическое количество осадков относится к очень сильному дождю в селевых районах (Приложение Г) [40].

На рисунке 3.6 отмечено, что при использовании схемы Кейна-Фрича для обеих сеток, прогноз относительно точно попадает в градации фактических осадков. А на рисунке 3.7 по интенсивности прогноз 6 раз попадает в градацию “очень сильный дождь”, отмечается 2 “сильный дождь” и 1 “дождь”.

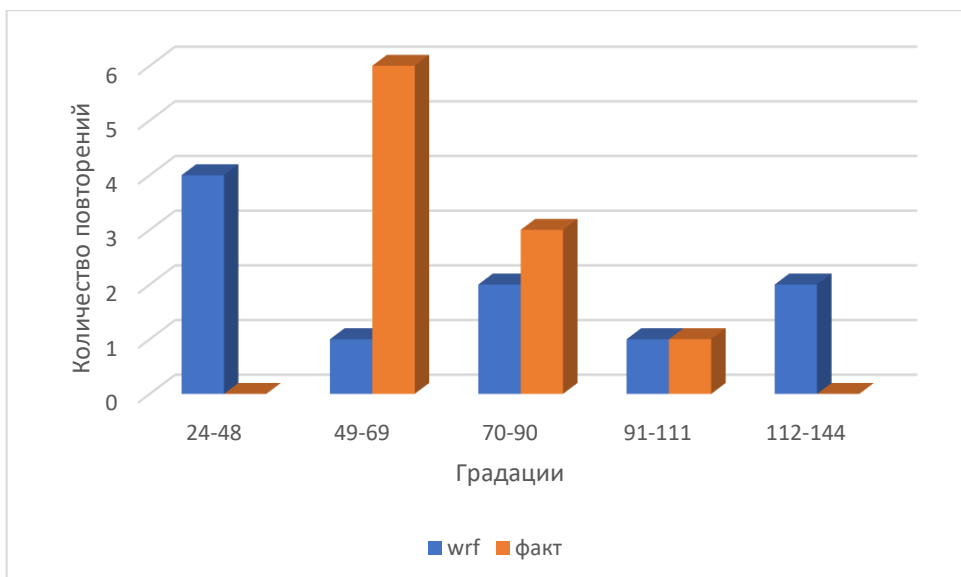


Рисунок 3.6 — Количество повторяющихся градаций при параметризации со схемой Кейна-Фрича на обеих сетках (1/1)

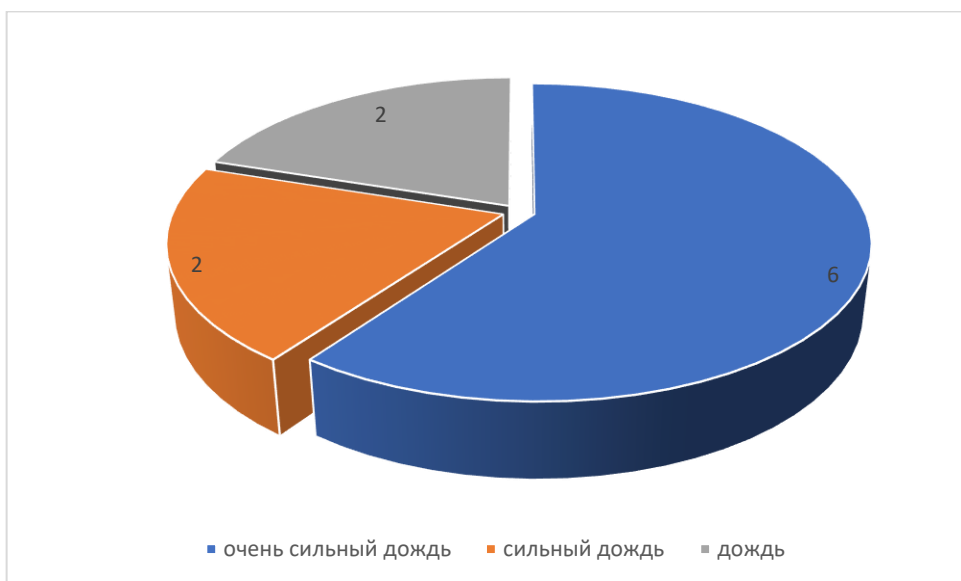


Рисунок 3.7 — Повторяемость прогнозируемой интенсивности при параметризации со схемой Кейна-Фрича на обеих сетках (1/1)

Расчетная корреляция между прогностическим и фактическим количеством осадков по шкале Чеддока (Приложение Г) является заметной для данной параметризации.

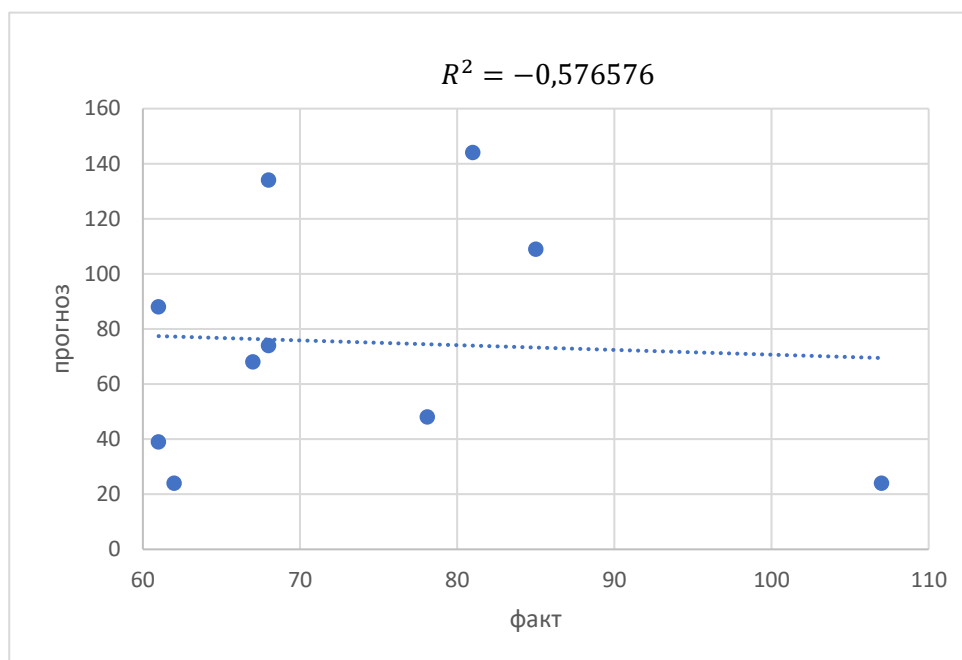


Рисунок 3.7 — Корреляция между фактическим и прогностическим значением осадков для параметризации со схемой Кейна-Фрича на обеих сетках (1/1)

При дальнейших изменениях параметризации для прогноза экстремальных осадков (1/0 и 6/6) все полученные значения попадали в градацию интенсивности “очень сильный дождь”, но градации по количеству осадков практически не совпадали с фактом (рис. 3.8, рис. 3.9). Фактическое значение оставалось полностью в первой градации, что говорит о сильном завышении количества осадков с использованием данных параметризаций.

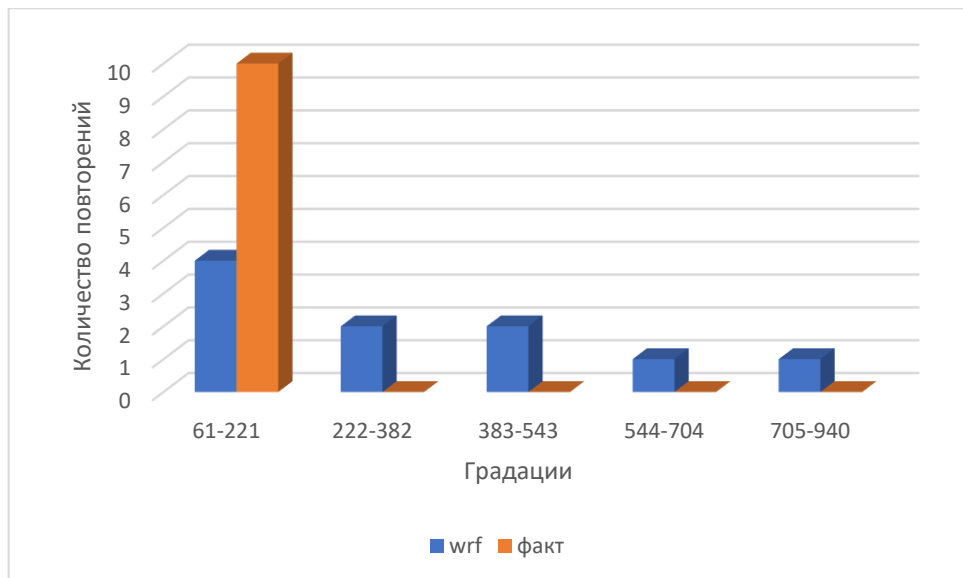


Рисунок 3.8 — Количество повторяющихся градаций при отсутствии параметризации кучевой облачности на вложенной сетке (1/0)

При использовании схемы Тидтке была обнаружена наибольшая несоответствие с фактической градацией осадков. Ошибка является максимальной среди всех выбранных в этой работе параметризаций. При фактических осадках в 67 мм за сутки WRF прогнозирует 1050 мм.

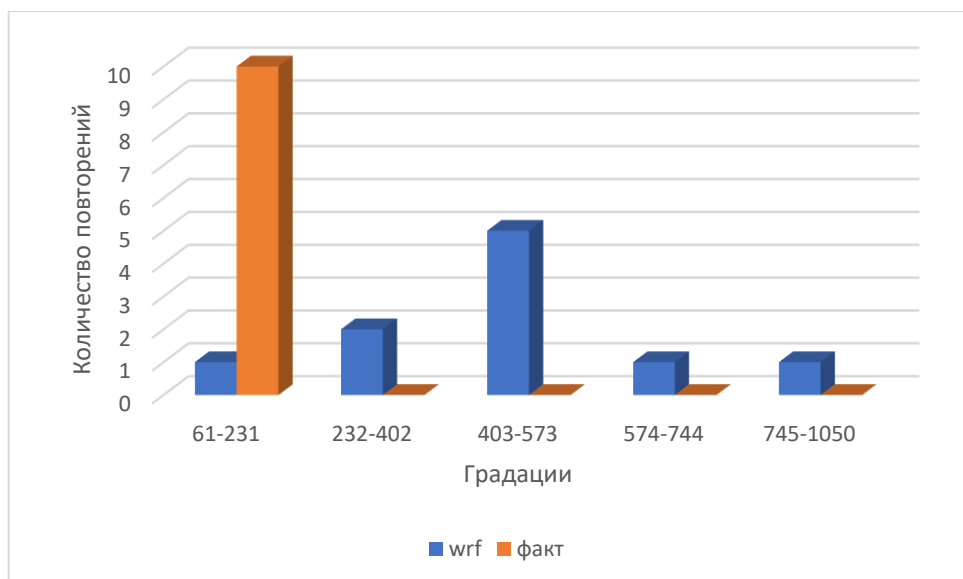


Рисунок 3.9 — Количество повторяющихся градаций. Схема Тидтке (6/6)

Также были сделаны графики для корреляции (рис. 3.10, рис. 3.11), которые показали низкое значение корреляции для обеих параметризаций. Это говорит о том, что схему Тидтке для всех сеток и комбинацию схемы Кейна-Фрича (в сетке 6,5x6,5) с отсутствием облачности (в сетке 2,16x2,16) не рекомендуется использовать для прогноза экстремальных осадков на данной территории.

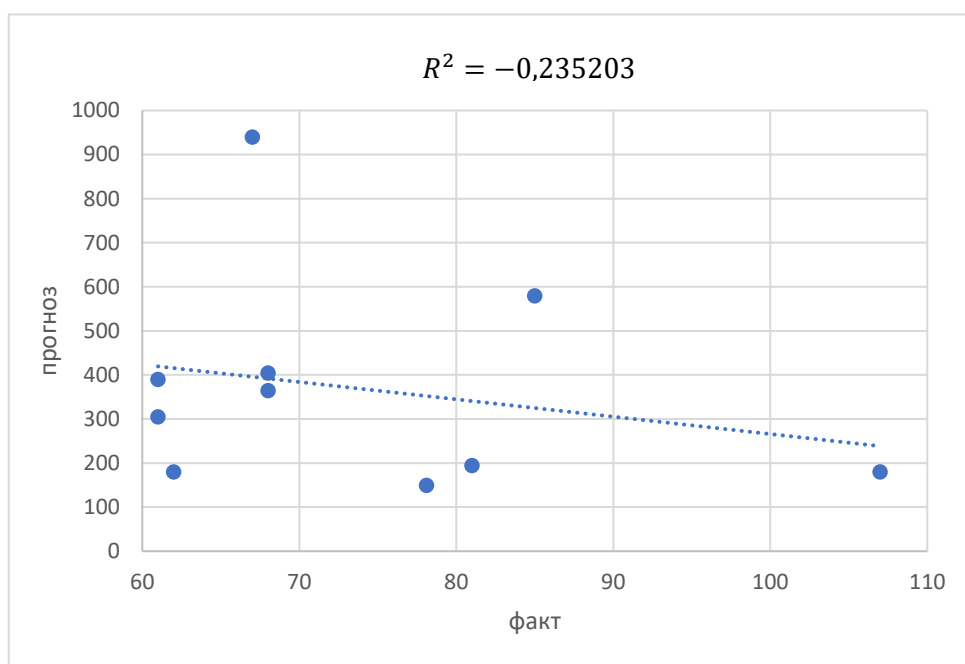


Рисунок 3.10 — Корреляция между фактическим и прогностическим значением осадков, отсутствие кучевой параметризации кучевой облачности на вложенной сетке (1/0)

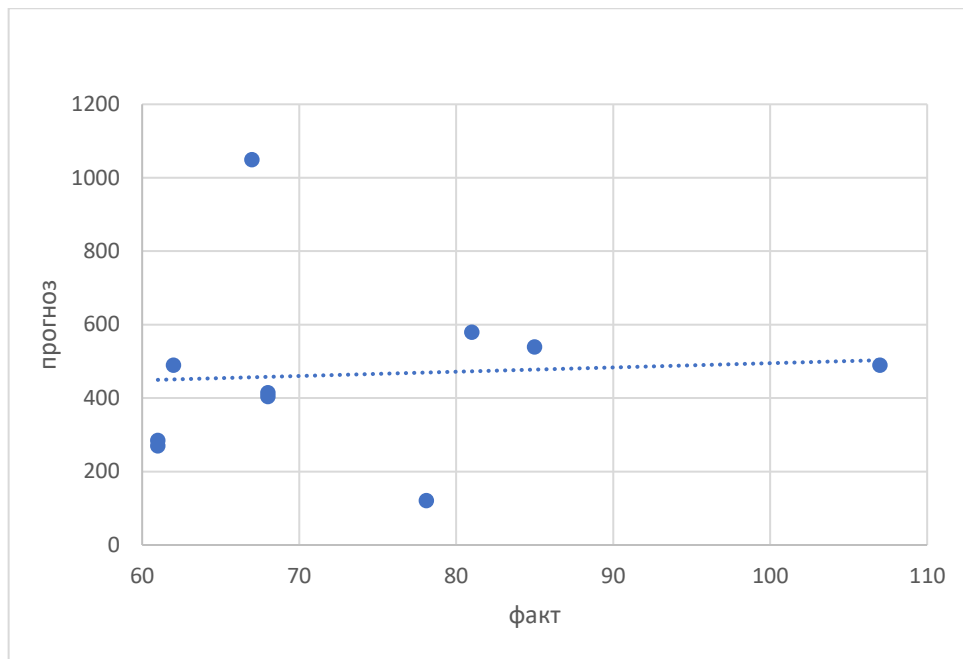


Рисунок 3.11 — Корреляция между фактическим и прогностическим значением осадков, схема Тидтке (б/б)

Для дополнительных сведений были использованы десять дней без осадков и проведены такие же исследования. Учитывая, что WRF имеет ошибку по пространству, прогнозирует осадки не в фактической точке их выпадения, и завышает количество осадков для данной территории, то по рисункам 3.12 и 3.13 можно сделать вывод, что параметризация с использованием схемы Кейна-Фрича для обеих сеток не очень хорошо прогнозирует отсутствие осадков на исследуемой территории, так как на 6 дней из 10 модель прогнозирует осадки.



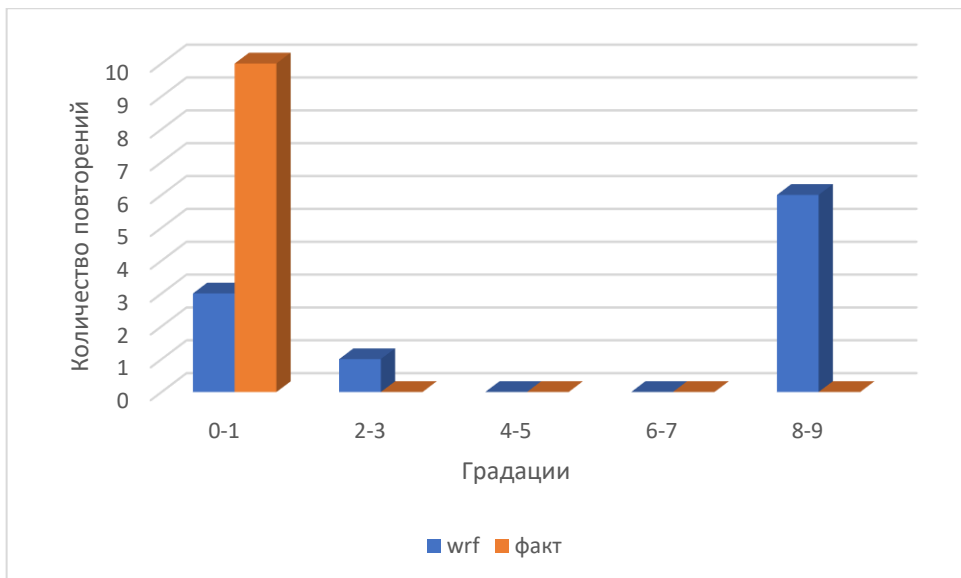


Рисунок 3.12 — Количество повторяющихся градаций для без осадков, схема Кейна-Фрича (1/1)



Рисунок 3.7 — Повторяемость прогнозируемой интенсивности для дней без осадков, схема Кейна-Фрича (1/1)

Модель имеет ошибки по пространству — по прогнозу место осадков не всегда совпадает с фактическими значениями. Также имеют место быть

ошибки по времени, то есть модель прогнозирует определенное количество осадков раз в 3 ч, но оно не всегда совпадает с фактическим значением из-за быстроменяющихся сложных атмосферных процессов.

По полученным данным ошибок, корреляции, градаций осадков можно сделать вывод, что оптимальной параметризацией для прогноза экстремальных осадков на территории города Сочи является схема Кейна-Фрича для обеих сеток модели, потому что она наиболее близко к фактическим данным моделирует осадки. Для дней без осадков модель в 70% случаев прогнозирует осадки.

### 3.6 Синоптический анализ

Дни с осадками были проанализированы для определения синоптической ситуации, влияющей на выпадение экстремальных осадков. Для этого была использована информация с приземных карт погоды за 0 ч с немецкого сайта <https://www.wetterzentrale.de>. Несколько карт приведены в Приложении В.

По изученным картам сделан вывод, что в дни экстремальных осадков в 90% случаев наблюдалась ложбина циклона. Лишь в один из дней отмечается влияние холодного фронта первого рода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие сильных осадков является опасным погодным явлением, а если они не спрогнозируемы заранее, они могут стать угрозой для многих областей человеческой деятельности.

В ходе работы были реализованы все поставленные задачи. В результате проделанной работы было выявлено:

- лучше всего модель дает прогноз на выбранной территории исследования при использовании на сетках схемы Кейна-Фрича;
- для дней без осадков модель с использованием схемы Кейна-Фрича в 70% случаев прогнозирует осадки;
- осадки на данной территории с выбранной параметризацией (схема Кейна-Фрича на обеих сетках, схема Кейна-Фрича только на сетке 6,5x6,15, схема Тидтке на обеих сетках) в 77% случаях завышаются;
- основной синоптической обстановкой, при которой выпадали экстремальные осадки за выбранный период, является ложбина циклона (90%), а также холодный фронт первого рода (10%);
- для лучшего прогноза рекомендуется использовать не только прогностическую информацию модели, но и карты погоды.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Богаткин, О. Г. Основы авиационной метеорологии [Текст]: учеб.пособие / О.Г. Богаткин. – СПб.: РГГМУ, 2009. - 339с.
2. Коршунова Н. Н. Рекордные морозы в январе 2006 года на территории Российской Федерации / Н. Н. Коршунова, О. Н. Булыгина, Л. Т. Трофименко // Анализ изменений климата и их последствий / Тр. ВНИИГМИ-МЦД» [Электронный ресурс]. –2007. – Вып. 173. – С. 215–220.  
<https://izvestiageo.isu.ru/ru/article?id=44>
3. Гидрометеорологическое обеспечение боевого применения высокоточного оружия класса «воздух-поверхность», журнал Военная мысль [Электронный ресурс], 2008, N3, март, стр.76-78  
<https://militaryarticle.ru/voennaya-mysl/2008-vm/10105-gidrometeorologicheskoe-obespechenie-boevogo>
4. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология [Текст]: учеб. для студ. вузов, обучающихся по спец. “Метеорология” / В.И. Воробьев; под ред. Г. Г. Тараканова. Л. : Гидрометиздат, 1991. - 616с
5. Савичев А.И. Синоптические методы прогноза погоды: учебное пособие [Электронный ресурс] / А.И. Савичев; [отв. Ред. В. И. Воробьев]; Ленингр. гидрометеорол. ин-т – Ленинград : ЛПИ, 1982. – 52 с.  
[http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/img-217135436.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-217135436.pdf)
6. Семенченко Б.А. Физическая метеорология [Электронный ресурс] : Учеб. Для вузов / Б. А. Семенченко. - М. : Аспект Пресс, 2002. – 415с.  
[https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_000962485/](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000962485/)
7. Зверев А.С. Синоптическая метеорология [Текст] : [учеб. Для вузов по спец “Метеоролия”] / А.С. Зверев. 2е изд., перераб и доп Л.: Гидрометиздат, 1977. – 711 с.

8. Дунайская гидрометеорологическая обсерватория [Электронный ресурс]: Технология подготовки краткосрочных прогнозов погоды <http://dhmo.org.ua/font-styles-mainmenu-54>
9. Барт А.А. Математическое моделирование загрязнения городского воздуха источниками антропогенной и биогенной эмиссии [Электронный ресурс] : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Барт А.А.; Национальный исследовательский Томский государственный университет. - Томск, 2014. – 18 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01005549458>
10. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 [Электронный ресурс] / 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. – Mode of access: [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/attic/arw\\_v3\\_bw.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/attic/arw_v3_bw.pdf)
11. Kessler E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation [Электронный ресурс], Meteor. Monogr., 32, Amer. Meteor. Soc., 84 p. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-935704-36-2\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-935704-36-2_1)
12. Ленская О.Ю., Численное моделирование характеристик пограничного слоя атмосферы крупного промышленного города (на примере г. Челябинска) [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-harakteristik-pogranichnogo-sloya-atmosfery-krupnogo-promyshlennogo-goroda-na-primere-g-chelyabinska>
13. ARW Version 3 Modeling System User's Guide [Электронный ресурс]. Mode of access: [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/user\\_guide\\_V3.9/users\\_guide\\_chap5.htm](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/user_guide_V3.9/users_guide_chap5.htm)
14. Применение ИТ в моделировании атмосферных процессов [Электронный ресурс], С.К. Бородко; М-во образования Республики

Беларусь, Беларусский государственный университет. – Минск, 2009.  
– 46 с.

[https://www.zinref.ru/000\\_uchebniki/04600\\_raznie\\_3/783\\_lekcii\\_raznie\\_10/524.htm](https://www.zinref.ru/000_uchebniki/04600_raznie_3/783_lekcii_raznie_10/524.htm)

15. Паскаль В.Ф., Моделирование воюции тропических циклонов по юго-западной части Индийского океана с использованием ассимиляции данных [Электронный ресурс] : автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.30 / В.Ф. Паскаль. - СПб., 2009. – 19 с

[https://www.rshu.ru/university/dissertations/pdf/2009\\_pascal.pdf](https://www.rshu.ru/university/dissertations/pdf/2009_pascal.pdf).

16. Ботыгин И.А., Программные средства построения мезомасштабных атмосферных моделей [Электронный ресурс] / Науковедение: интернет-журнал – 2015. – Т. 7, №6.

<https://cyberleninka.ru/article/n/programmnye-sredstva-postroeniya-mezomasshtabnyh-atmosfernyh-modeley>

17. Смирнова М.М., Анализ примеров усвоения данных в региональной модели WRF-ARW [Электронный ресурс] / Смирнова М.М., Рубинштейн К.Г. // Гидрометцентр России. Труды. Вып. 347, 2012. – 95-112 с.

[http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/img-57952.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-57952.pdf)

18. Barker D.M., Huang W., Guo Y.R., Xiao Q.N., A Three-Dimensional (3DVAR) Data assimilation system for use with MM5: Implementation and Initial results [Электронный ресурс] / Mon. Weath. Rev. - 2004. – Vol. 132. – 897–914 p.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2543692>

19. Красюк Т.В., Усвоение данных: конкуренция методов и проблема усвоение спутниковых наблюдений [Электронный ресурс] / Т.В. Красюк // Труды ГУ “ГМЦ РФ”. – Вып. 348, 2012 – 43-60 с.

[http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/img-48775.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-48775.pdf)

20. Коломеец Л.И., Смышляем С.П., Модельное исследование обратных связей между грозовой активностью и составом атмосферы [Электронный ресурс] // Ученые записки РГГМУ, 2014 № 37 – 177-190с.  
<https://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue37/uz37-177-190.pdf>
21. Вельтищев Н.Ф., Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW И WEF-NMM [Электронный ресурс] / Н.Ф. Вельтищев, Д.В. Жупанова // 80 лет Гидрометцентру России. 1939-2010, 2010. – 94-135 с.  
[https://method.meteorf.ru/publ/books/80\\_years/velt\\_zh.pdf](https://method.meteorf.ru/publ/books/80_years/velt_zh.pdf)
22. Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983 [Электронный ресурс]: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. J. Climate Appl. Meteor., 22, 1065–1092 p.  
[https://typeset.io/papers/bulk-parameterization-of-the-snow-field-in-a-cloud-model-2gxf31uwuh?citations\\_page=107](https://typeset.io/papers/bulk-parameterization-of-the-snow-field-in-a-cloud-model-2gxf31uwuh?citations_page=107)
23. Зуев В.Е., Оптика атмосферы и климат [Электронный ресурс]: монография / В.Е. Зуев, Г.А. Титов. - Томск: Спектр, 1996. – 271 с.  
[http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/img-090561.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-090561.pdf)
24. Hong S.-Y., Dudhia J. and Chen S.-H. [Электронный ресурс] A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. // Mon. Wea. Rev., 2004, Vol.132, No. 1. P. 103—120  
[https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/132/1/1520-0493\\_2004\\_132\\_0103\\_aratim\\_2.0.co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/132/1/1520-0493_2004_132_0103_aratim_2.0.co_2.xml)
25. Thompson, Gregory, Paul R. Field, Roy M. Rasmussen, William D. Hall, 2008 [Электронный ресурс]: Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. Mon. Wea. Rev., 136, 5095–5115.  
<https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/136/12/2008mwr2387.1.xml>

26. Matsui, T., S. Q. Zhang, W.-K. Tao, S. Lang, C. Ichoku, and C. Peters-Lidard, 2018: Impact of radiation frequency, precipitation radiative forcing, and radiation column aggregation on convection-permitting West African Monsoon simulations. *Clim. Dyn* [Электронный ресурс], 1-21.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4187-2>
27. Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.* [Электронный ресурс], 102, 16663–16682  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97JD00237>
28. Fels, Stephen. B., and M. D. Schwarzkopf, 1981, An efficient, accurate algorithm for calculating CO<sub>2</sub> 15 μm band cooling rates. *J. Geophys. Res.* [Электронный ресурс], 86, 1205–1232.  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/>
29. Collins, William D., et al., 2004: Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0). [Электронный ресурс] NCAR Tech. Note NCAR/TN–464+STR. 214 pp.  
<https://www2.cesm.ucar.edu/models/atmcam/docs/description/node1.html>
30. Dudhia, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model // *J. Atmos. Sci.* [Электронный ресурс] – 1989. – V. 46. – PP. 3077–3107.  
[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/SW\\_LW/Dudhia.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/SW_LW/Dudhia.pdf)
31. NOAA, cited 2001: National Oceanic and Atmospheric Administration Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. [Available online at <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbpll/eta12tpb/>]

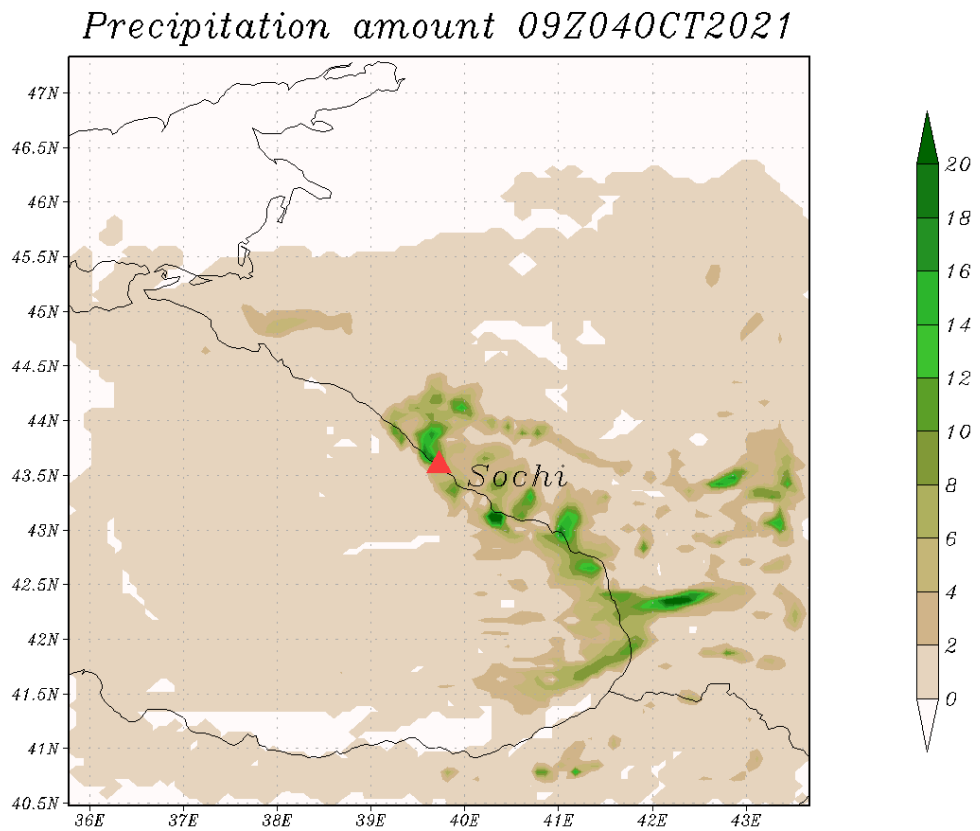


32. Janjic, Z. I., 2002: Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note No. 437 [Электронный ресурс], 61 pp.  
[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/SURFACE\\_LAYER/eta\\_part4.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/SURFACE_LAYER/eta_part4.pdf)
33. Pleim, Jonathan E., 2007: A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. J. Appl. Meteor. Climatol. [Электронный ресурс], 46, 1383–1395  
[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/PBL/ACM2.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/PBL/ACM2.pdf)
34. Janjic, Z. I., 1994: The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Mon. Wea. Rev. [Электронный ресурс], 122, 927–945.  
[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/PBL/MYJ.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/PBL/MYJ.pdf)
35. Benjamin, Stanley G., Georg A. Grell, John M. Brown, and Tatiana G. Smirnova, 2004: Mesoscale weather prediction with the RUC hybrid isentropic-terrain-following coordinate model. Mon. Wea. Rev. [Электронный ресурс], 132, 473–494.  
[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/LAND\\_SURFACE/RUC.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/LAND_SURFACE/RUC.pdf)
36. Grell, Georg A., 1993: Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. Mon. Wea. Rev. [Электронный ресурс], 121  
[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/CU\\_PHYS/Grell3D\\_part1.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/CU_PHYS/Grell3D_part1.pdf)
37. Grell, G. A., D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. Geophys. Res. Lett. [Электронный ресурс], 29, 1693.  
[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/CU\\_PHYS/Grell3D\\_part2.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/CU_PHYS/Grell3D_part2.pdf)

38. Berg, L.K., W.I. Gustafson, E.I. Kassianov, E.I., and L. Deng, 2013: Evaluation of a modified scheme for shallow convection: Implementation of CuP and case studies. Mon. Wea. Rev. [Электронный ресурс], 141 [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/CU\\_PHYS/KF\\_CU\\_POT.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/CU_PHYS/KF_CU_POT.pdf)
39. Tiedtke, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. Mon. Wea. Rev. [Электронный ресурс], 117, 1779–1800. [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/CU\\_PHYS/Tiedtke\\_part1.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/CU_PHYS/Tiedtke_part1.pdf)
40. Zhang, Chunxi, Yuqing Wang, and Kevin Hamilton, 2011: Improved representation of boundary layer clouds over the southeast pacific in ARW–WRF using a modified Tiedtke cumulus parameterization scheme. Mon. Wea. Rev. [Электронный ресурс], 139, 3489–3513. [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/CU\\_PHYS/Tiedtke\\_part2.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/CU_PHYS/Tiedtke_part2.pdf)
41. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Москва ФГБУ «Гидрометцентр России». 2019 [Электронный ресурс] стр. 16, 33 <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/RHM/nast-KPP-2019.pdf>

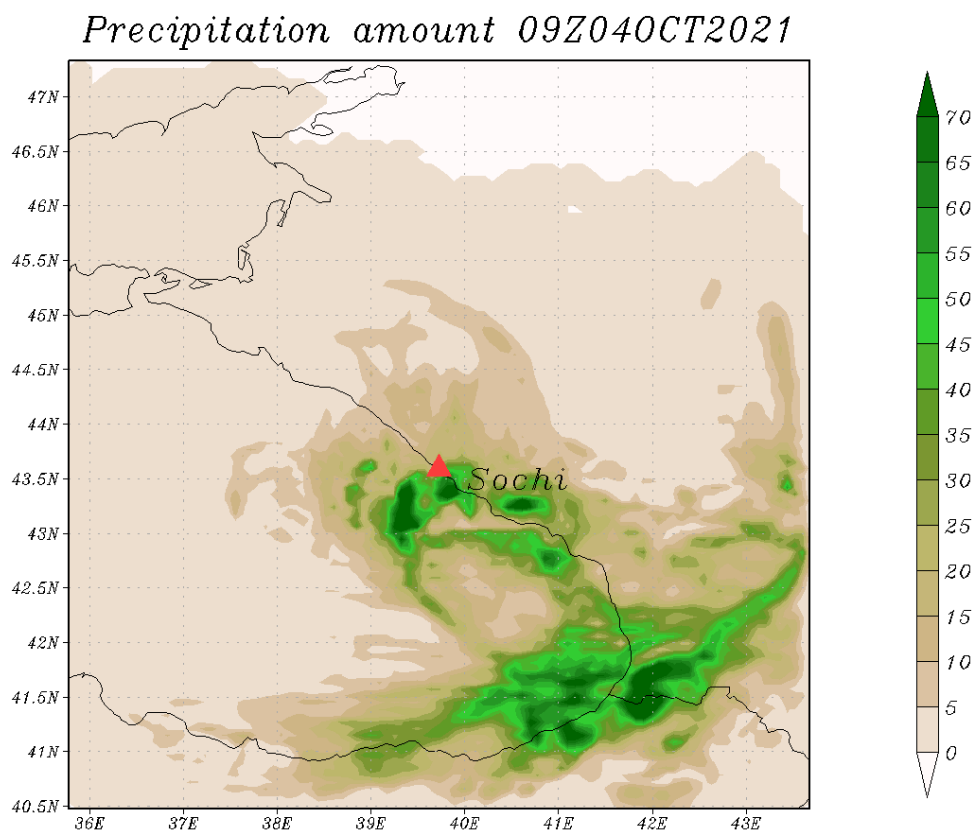
## Приложение А

Полученное поле осадков за 3 ч на 09 ч 4.10.2021г (схема Кейна-Фрича на обеих сетках)



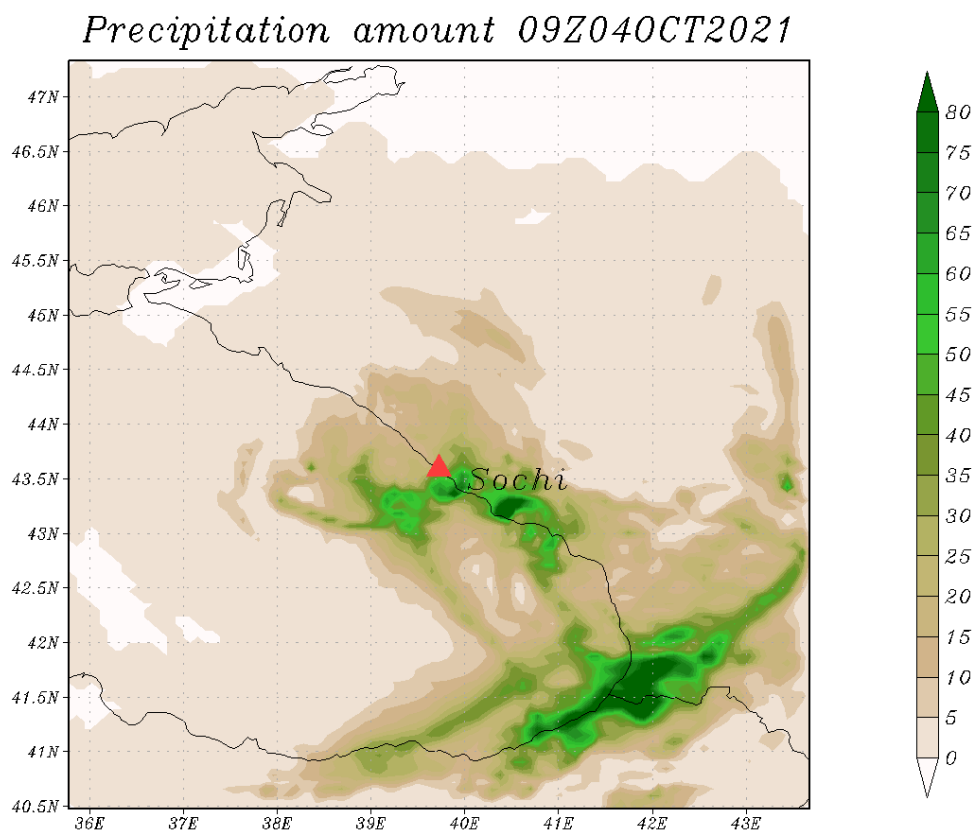
GrADS: COLA/IGES

Полученное поле осадков за 3 ч на 09 ч 4.10.2021г (Схема Кейна-Фрича на сетке 6,5x6,5)



GrADS: COLA/IGES

Полученное поле осадков за 3 ч на 09 ч 4.10.2021г (схема Тидтке на  
обеих сетках)



GrADS: COLA/IGES

## Приложение Б

Пример namelist.input для даты 4.10.2021г (схема Тидтке на обеих сетках)

```
&time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 60,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2021,    2021,
start_month        = 10,     10,
start_day          = 03,     03,
start_hour         = 00,     00,
start_minute       = 00,     00,
start_second       = 00,     00,
end_year           = 2021,    2021,
end_month          = 10,     10,
end_day            = 05,     05,
end_hour           = 12,     12,
end_minute         = 00,     00,
end_second         = 00,     00,
interval_seconds   = 21600,
input_from_file    = .true.,  .true.,
history_interval   = 180,     60,
frames_per_outfile = 1000,    1000,
restart            = .false.,
restart_interval   = 5000,
io_form_history    = 2,
io_form_restart    = 2,
io_form_input      = 2,
io_form_boundary   = 2,
debug_level        = 0,
/

&domains
time_step          = 30,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom            = 2,
e_we               = 100,     88,
e_sn               = 120,     106,
e_vert             = 35,     35,
p_top_requested    = 5000,
num_metgrid_levels = 34,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                 = 6500, 2166.667,
dy                 = 6500, 2166.667,
grid_id            = 1,     2,
parent_id          = 1,     1,
i_parent_start     = 1,     36,
j_parent_start     = 1,     43,
parent_grid_ratio   = 1,     3,
parent_time_step_ratio = 1,  3,
feedback           = 1,
smooth_option      = 0,
/

&physics
mp_physics         = 3,     3,
ra_lw_physics      = 1,     1,
ra_sw_physics      = 1,     1,
radt               = 30,    30,
sf_sfclay_physics  = 1,     1,
```

```

sf_surface_physics      = 2,      2,
bl_pbl_physics         = 1,      1,
bldt                   = 0,      0,
cu_physics              = 6,      6,
cudt                   = 5,      5,
isfflx                 = 1,
ifsnow                  = 0,
icloud                  = 1,
surface_input_source   = 1,
num_soil_layers        = 4,
sf_urban_physics       = 0,      0,
maxiens                 = 1,
maxens                  = 3,
maxens2                 = 3,
maxens3                 = 16,
ensdim                  = 144,
/

&fdda
/

&dynamics
w_damping               = 0,
diff_opt                = 1,

```

## Пример скрипта отрисовки полей осадков для даты 4.10.2021г

```

'reinit'
'set display color white'
'c'
'open test20211003_66.ctl'
'set mpdraw on'
'set mpdset hires'
'set grads off'
'set string 1 tc 4 0'
'set strsiz 0.16'
'set font 1'
'set gxout shaded'
tt=2
tt1=tt-1
while(tt<=21)
  'set t 'tt
  say 't= ' tt
  'q time'
  time=subwrd(result,3)
  'define
precip1=rainnc(t='tt')+snowc(t='tt')+rainc(t='tt')+rainsh(t='tt')+snownc(t='tt')+gr
aupelnc(t='tt')+hailnc(t='tt')'
  'define
precip2=rainnc(t='tt1')+snowc(t='tt1')+rainc(t='tt1')+rainsh(t='tt1')+snownc(t='tt1
')+graupelnc(t='tt1')+hailnc(t='tt1')'
  say 't= 'tt
  'run color.gs 0 80 5 -gxout shaded -var precip1-precip2 -kind snow->tan->darkkhaki-
>olivedrab->limegreen->forestgreen->darkgreen'
  'd precip1-precip2'
  'run cbarn'
  'draw title Precipitation amount 'time
  'run cbarn
  'q time'
  time=subwrd(result,3)
  plat.1=43.5992
  plon.1=39.7257
  'query w2xy 'plon.1' 'plat.1
  xpos=subwrd(result,3)
  ypos=subwrd(result,6)
  'set line 2'
  'draw mark 9 'xpos' 'ypos' 0.25'
  'set string 1 tc 4 0'
  'set strsiz 0.2'

```

```

'set font 2'
'draw string 'xpos+0.7' 'ypos' Sochi'
'q time'
time=subwrd(result,3)
'printim case_precip/precip'time'.png x1280 y960 white'
'c'
tt=tt+1
endwhile

```

## Пример скрипта выборки переменных различных видов осадков для даты 4.10.2021г (схема Тидтке на обеих сетках)

```

name='test20211003_66.nc'
rm -rf output/test_sochi.txt &> log
rm -rf output/test_rainnc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_snownc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_snowc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_rainc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_rainsh_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_graupelnc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_hailnc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_rainnc.nc &> log
rm -rf output/test_snownc.nc &> log
rm -rf output/test_snowc.nc &> log
rm -rf output/test_rainc.nc &> log
rm -rf output/test_rainsh.nc &> log
rm -rf output/test_graupelnc.nc &> log
rm -rf output/test_hailnc.nc &> log
rm -rf output/itog_sochi.txt &> log
rm -rf output/itog_sochi.nc &> log
cdo -selvar,rainnc $name output/test_rainnc.nc
cdo -selvar,snownc $name output/test_snownc.nc
cdo -selvar,rainc $name output/test_rainc.nc
cdo -selvar,rainsh $name output/test_rainsh.nc
cdo -selvar,snowc $name output/test_snowc.nc
cdo -selvar,graupelnc $name output/test_graupelnc.nc
cdo -selvar,hailnc $name output/test_hailnc.nc
lon=39.7257
lat=43.5992
cdo -remapnn,lon=$lon/lat=$lat output/test_rainnc.nc output/test_rainnc_sochi.nc
cdo -remapnn,lon=$lon/lat=$lat output/test_snownc.nc output/test_snownc_sochi.nc
cdo -remapnn,lon=$lon/lat=$lat output/test_rainc.nc output/test_rainc_sochi.nc
cdo -remapnn,lon=$lon/lat=$lat output/test_rainsh.nc output/test_rainsh_sochi.nc
cdo -remapnn,lon=$lon/lat=$lat output/test_snowc.nc output/test_snowc_sochi.nc
cdo -remapnn,lon=$lon/lat=$lat output/test_graupelnc.nc
output/test_graupelnc_sochi.nc
cdo -remapnn,lon=$lon/lat=$lat output/test_hailnc.nc output/test_hailnc_sochi.nc
cdo enssum output/test_rainnc_sochi.nc output/test_snownc_sochi.nc
output/test_rainc_sochi.nc output/test_rainsh_sochi.nc output/test_rainsh_sochi.nc
output/test_graupelnc_sochi.nc output/test_hailnc_sochi.nc output/itog_sochi.nc
#cdo outputtab,value,date,time output/test_rainnc_sochi.nc >
output/test_rainnc_sochi.txt
#cdo outputtab,value,date,time output/test_snownc_sochi.nc >
output/test_snownc_sochi.txt
#cdo outputtab,value,date,time output/test_rainc_sochi.nc >
output/test_rainc_sochi.txt
#cdo outputtab,value,date,time output/test_rainsh_sochi.nc >
output/test_rainsh_sochi.txt
#cdo outputtab,value,date,time output/test_snowc_sochi.nc >
output/test_snowc_sochi.txt
#cdo outputtab,value,date,time output/test_graupelnc_sochi.nc >
output/test_graupelnc_sochi.txt
#cdo outputtab,value,date,time output/test_hailnc_sochi.nc >
output/test_hailnc_sochi.txt
cdo outputtab,value,date,time output/itog_sochi.nc > output/itog_sochi.txt
rm -rf output/test_rainnc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_snownc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_snowc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_rainc_sochi.nc &> log

```

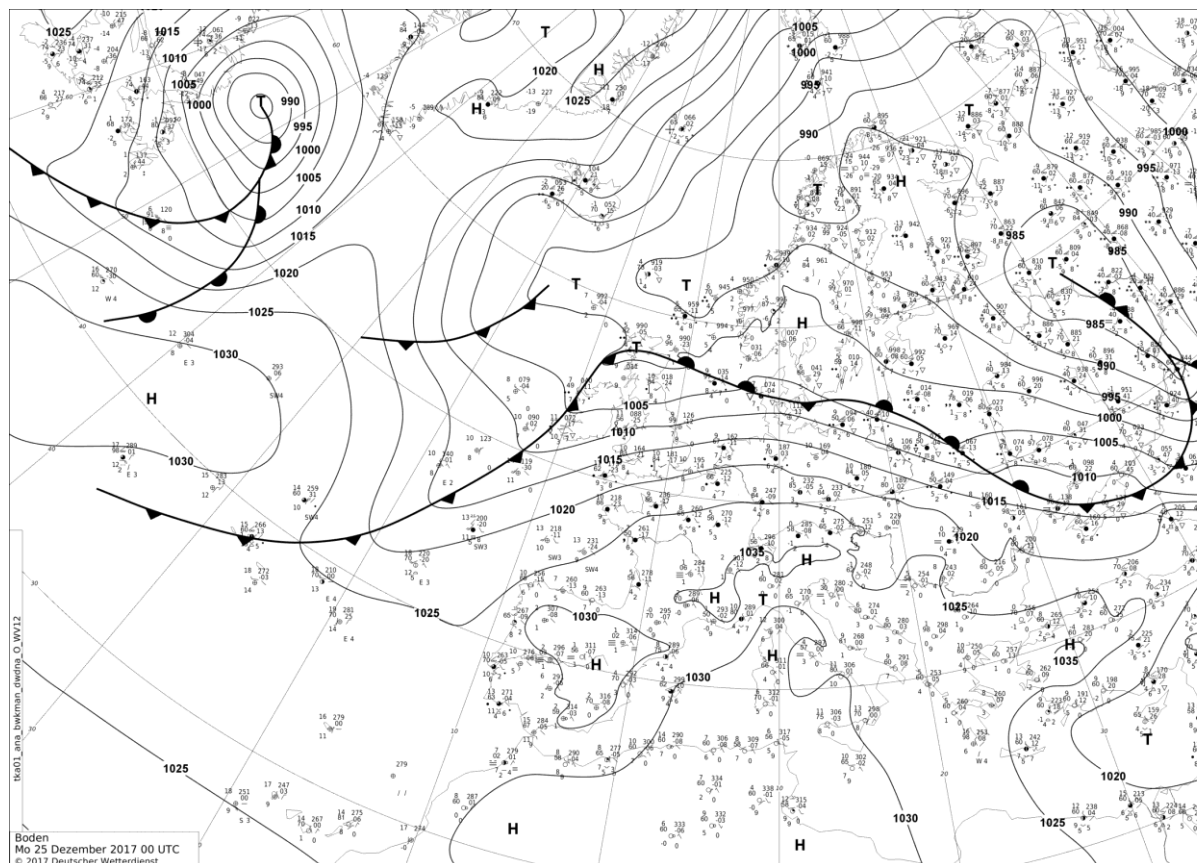


```
rm -rf output/test_rainsh_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_graupelnc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_hailnc_sochi.nc &> log
rm -rf output/test_rainnc.nc &> log
rm -rf output/test_snownc.nc &> log
rm -rf output/test_snowc.nc &> log
rm -rf output/test_rainc.nc &> log
rm -rf output/test_rainsh.nc &> log
rm -rf output/test_graupelnc.nc &> log
rm -rf output/test_hailnc.nc &> log
```

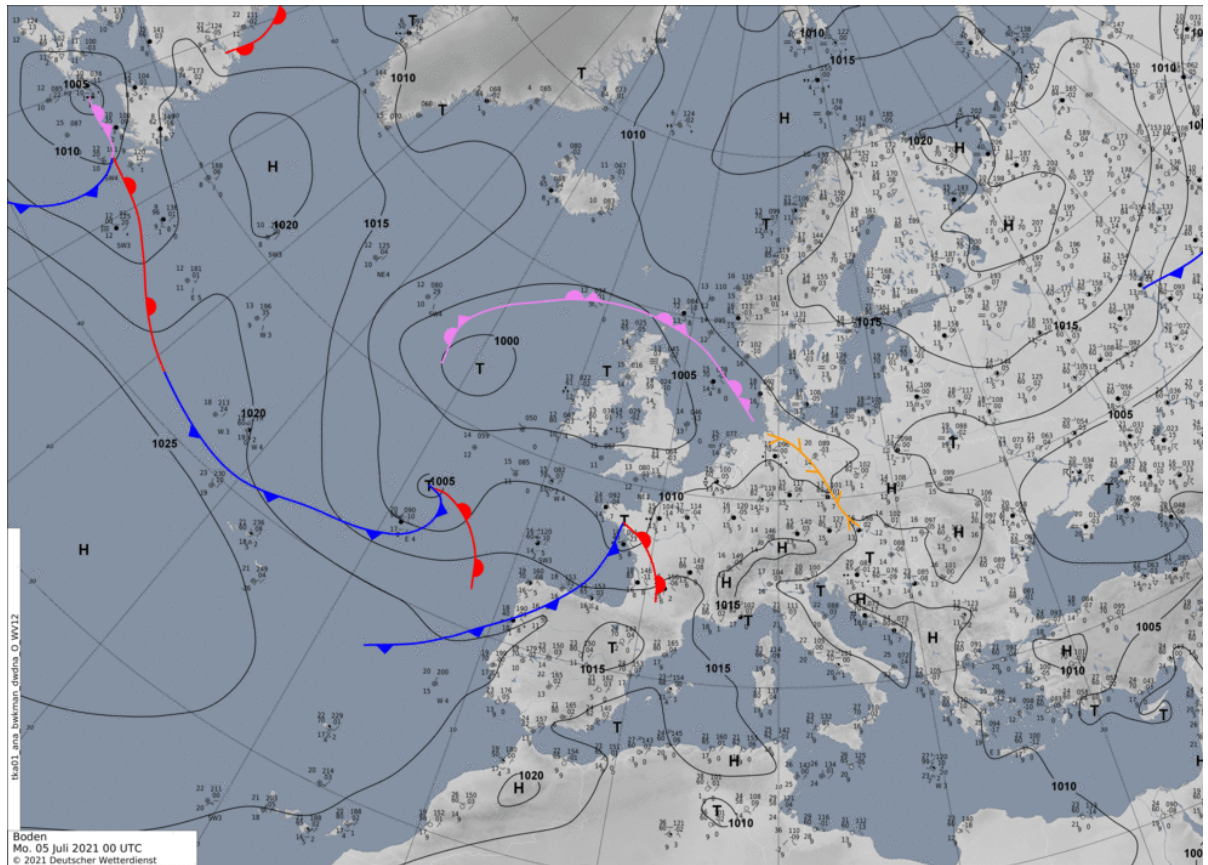
## Приложение В

Приземные карты погоды (DWD) с сайта <https://www.wetterzentrale.de>

Приземная карта за 0 ч 25.12.2017 (холодный фронт)



# Приземная карта за 0 ч 05.07.2021г (ложбина)



## Приложение Г

Термины, применяемые при прогнозировании жидких и приравненных к ним смешанных осадков, и соответствующие им количественные характеристики [41]

| Термин   | Количество осадков за 12 ч, мм  |
|--|---|
| Без осадков  | –   |
| Преимущественно без осадков, без существенных осадков, слабый дождь, слабые осадки*  | 0,0–0,2   |
| Небольшой дождь, морось, морозящие осадки, небольшие осадки (мокрый снег, дождь со снегом, дождь и снег, дождь, переходящий в снег)  | 0,3–2   |
| Дождь (умеренный дождь), дождливая погода, осадки (умеренные осадки) (мокрый снег, дождь со снегом, дождь и снег, дождь, переходящий в снег)   | 3–14  |
| Кратковременный дождь (для осадков конвективного характера)  | 0,3–14  |
| Сильный дождь, ливневый дождь (ливень), сильные осадки (мокрый снег, дождь со снегом, дождь и снег, дождь, переходящий в снег)<br>То же в селеопасных районах<br>То же для Черноморского побережья Кавказа   | 15–49<br><br>15–29<br>В соответствии с критериями, установленными ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС»   |
| Очень сильный дождь, очень сильные осадки (мокрый снег, дождь со снегом, дождь и снег, дождь, переходящий в снег)<br>То же в селеопасных районах<br>То же для Черноморского побережья Кавказа<br><br>Сильный ливень (сильные ливни)<br>То же для Черноморского побережья Кавказа | ≥50<br><br>≥30<br>В соответствии с критериями, установленными ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС»<br><br>≥30 мм за период ≤1 ч<br>В соответствии с критериями, установленными ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» |
| * Термины «слабый дождь» и «слабые осадки» (в прогнозе по территории) применяются только с одновременным использованием термина «в отдельных районах» или «местами».   |   |

## Шкала Чеддока для определения зависимости корреляции

| Шкала Чеддока |               |
|---------------|---------------|
| 0,1-0,3       | низкая        |
| 0,3-0,5       | высокая       |
| 0,5-0,7       | заметная      |
| 0,7-0,9       | высокая       |
| 0,9-0,99      | очень высокая |

Таблица Оправдываемость прогноза количества жидких и приравненных к ним смешанных осадков [41]

| Прогноз   |                                     | $P_{гр.}$ %, при количестве фактически выпавших осадков за 12 ч, мм |         |       |                   |       |                              |                 |              |
|---|-------------------------------------|---|---------|-------|-------------------|-------|------------------------------|-----------------|--------------|
| Качественная характеристика   | Количественное значение за 12 ч, мм | Без осадков   | 0,0–0,2 | 0,3–2 | 3–14, в том числе |       | 15–49 (15–29)**, в том числе |                 | ≥50<br>≥30** |
|   |                                     |   |         |       | 3–9               | 10–14 | 15–39 (15–23)**              | 40–49 (24–29)** |              |
| Без осадков   | –                                   | 100   | 75      | 50    | 0                 |       | 0                            |                 | 0            |
| Преимущественно без осадков, без существенных осадков, слабый дождь, слабые осадки* | 0,0–0,2                             | 100   | 100     | 75    | 0                 |       | 0                            |                 | 0            |
| Небольшой дождь, небольшие осадки*  | 0,3–2                               | 50  | 100     | 100   | 50                |       | 0                            |                 | 0            |
| (Умеренный) дождь, (умеренные) осадки*  | 3–14                                | 0   | 0       | 50    | 100               |       | 50                           |                 | 0            |
| Кратковременный дождь (для осадков конвективного характера)                         | 0,3–14                              | 0   | 50      | 100   | 100               |       | 50                           |                 | 0            |
| Сильный дождь, ливневый дождь, сильные осадки*                                      | 15–49 (15–29)**                     | 0   | 0       | 0     | 50                | 100   | 100                          |                 | 0            |
| Очень сильный дождь, очень сильные осадки*  | ≥50<br>≥30**                        | 0   | 0       | 0     | 0                 |       | 0                            | 100             | 100          |
| Сильный ливень  | ≥30 за ≤1 ч                         | 0 при <24 мм за ≤1 ч<br>100 при ≥24 мм за ≤1 ч                      |         |       |                   |       |                              |                 |              |
| * Термины – по таблице 3.   |                                     |   |         |       |                   |       |                              |                 |              |
| ** В селеопасных районах.   |                                     |   |         |       |                   |       |                              |                 |              |