



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская работа)

На тему «Гидродинамический прогноз погоды для Бурунди»

Исполнитель **НдикуманаЭлиас, МАП-М19-1**
(фамилия, имя, отчество)

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

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

кандидат физико-математических наук, доцент
Ольга Георгиевна Анискина
(фамилия, имя, отчество)

«16» июня 2021г.

Санкт-Петербург
2021

Содержание

Введение.....	2
1. Климат Бурунди	5
1.1. Последствия изменения климата в Бурунди.....	6
1.2. карты уязвимости республики Бурунди.....	9
1.2.1. Карта уязвимости к эрозии.....	9
1.2.2. Карта уязвимости к засухе	13
2. Метод исследования «Модель WRF-ARW»	17
2.1. Схема дискретизаций уравнений движения на пространственной сетке Аракавы класса «С»	18
2.2. Начальные данные	19
Структура модели WRF ARW.....	20
2.3. Гидродинамические прогнозы для республики Бурунди с помощью модели «WRF-ARW»	22
3. Оценка качества гидродинамического прогноза для Бурунди	24
3.1. Оценка качества гидродинамического прогноза для станций Бужумбура.....	24
3.1.1. оценка гидродинамического прогноза температуры на станции Бужумбура.	24
3.1.2. Оценка гидродинамического прогноза количества осадков на станции Бужумбура.	38
3.2. Оценка качества гидродинамического прогноза для станций Гитега.....	47
3.2.1 оценка гидродинамического прогноза температуры на станции Гитега.....	47
1.2.2. Оценка гидродинамического прогноза количества осадков на станции Гитега.....	60
3.3 . Оценка качества гидродинамического прогноза для станций Мусаса.	66
3.3.1. оценка гидродинамического прогноза температуры на станции Мусаса.	66
3.4. Оценка качества гидродинамического прогноза для станций Руийги.....	84
3.4.1 оценка гидродинамического прогноза температуры на станции Руийги.....	84
3.4.2 Оценка гидродинамического прогноза количества осадков на станции Руийги.....	90
Список использованных источников	97
Приложение	98

Введение

В настоящее время, в разных точках Земли наблюдаются опасные и /или неблагоприятные явления, вызванные внезапным изменениям погоды. Существуют разные гидрометеорологические стихийные бедствия, которые приводят к ухудшению жизни на Земле.

В разные эпохи человек по-разному отреагировал на изменения погоды и как следствие, возникли различные способы предсказания изменения погодных условий, чтобы предотвратить последствий стихийных бедствий, вызванных внезапными изменениями погоды. В ходе решения проблемы последствий изменения погоды, были разработаны разные способы составления прогнозов такие как: гидродинамический прогноз, синоптический прогноз, статистический прогноз, стохастический прогноз, ансамблевый прогноз и так далее.

Несмотря на эти очень важные достижения, до сих пор не существует идеального прогнозирования изменения погодных условий, так как не все процессы изучены, чтобы на сто процентов понимать всё, что приводит к изменению погоды. Кроме этого, современные технологии не позволяют решать все функции, которые описывают процессы изменения погоды.

Исходя из того, что сказано выше, наблюдаются до сих пор ошибки прогнозирования внезапных изменений погоды. В качестве примера, несмотря на различные способы прогнозирования погоды, существующие в Бурунди, в последние десятилетия наблюдались различные неожиданные стихийные бедствия из-за отсутствия правильных результатов прогнозирования изменения погоды.

Для решения вышесказанной проблемы в данном исследовании анализируется возможность применения мезомасштабной модели для нахождения надежных результатов прогнозирования. Проведены различные эксперименты для нахождения оптимальной параметризации физических процессов.

Цель ВКР магистра – исследовать возможность применения мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW для прогноза сильных осадков в Бурунди.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

Проанализировать климатические характеристики осадков в Бурунди;

Изучить мезомасштабную гидродинамическую модель WRF-ARW;

Адаптировать модель к региону исследования;

Провести численные эксперименты;

Выбрать оптимальные характеристики динамического ядра модели и параметризаций.

Основные характеристики модели WRF-ARW, используемые при прогнозе на территории Бурунди:

- Шаг по пространству: $dx = dy = 3,5 \text{ km}$
- Шаг по времени: 30 секунд
- Количество узлов: 8820
- Количество уровней по вертикале: 24
- Количество уровней по горизонтали: 99 по x; 91 по y
- Количества моментов времени: 7
- Заблаговременность прогнозов: 36 часов

Число прогнозов сделаны в апреле и июле 2018 на станции «Бужумбура»: 122

ВКР магистра состоит из введения, трёх глав, заключения и приложения.

В первой главе описан климат Бурунди и основные закономерности формирования осадков на исследуемой территории.

Во второй главе

В третьей главе

В заключении приведены выводы, полученные при исследовании и рекомендации для дальнейшего изучения.

Список использованных источников содержит наименования.

1. Климат Бурунди

Бурунди — государство, не имеющее выхода к морю. Общая протяжённость границы — 974 км. Граничит: на западе — с Демократической Республикой Конго (233 км), на севере — с Руандой (290 км), на востоке и юго-востоке — с Танзанией (451 км). Площадь страны составляет 27 830 км², из которых 25 650 км² приходится на сушу. Государство расположено на плато, спускающемся на юго-западе к озеру Танганьика.

Территория в основном состоит из плато. На западе расположена меридионально направленная горная цепь, которая продолжается в Руанде. Средняя высота центрального плато — от 1 525 до 2 000 м. Расположенная к юго-востоку от Бужумбуры гора Хека (наивысшая вершина страны), достигает 2 760 метров. На юго-востоке и юге страны возвышенности достигают около 1370 метров. Полоса земли вдоль реки Рузизи к северу от озера Танганьика, являющаяся частью Восточно-Африканской рифтовой долины, — единственная область страны ниже 915 метров. Около озера Танганьика находится и самая низкая точка страны — 772 метра. Озеро Танганьика и впадающая в него пограничная река Рузизи лежат на расширяющейся к северу равнине с плодородными почвами. В центре страны и на востоке расположены равнины, окружённые горами и болотами.

Климат Бурунди в основном тропический со значительными дневными амплитудами температур. Температура заметно варьируется в зависимости от высоты в разных регионах страны. Средняя температура в центральном плато составляет 20 °С, на территории вокруг озера Танганьика — 23 °С, на территориях наиболее высоких гор — 16 °С. Средняя годовая температура в Бужумбуре составляет 23 °С.

Осадки нерегулярны, наиболее обильны на северо-западе страны. На большей части Бурунди среднее годовое количество осадков составляет

1300—1600 мм, на равнине Рузизи и северо-восточной части страны — 750—1000 мм. Выделяют четыре сезона в зависимости от выпадения осадков:

- длинный сухой сезон (июнь — август),
- короткий влажный сезон (сентябрь — ноябрь),
- короткий сухой сезон (декабрь — январь),
- длинный влажный сезон (февраль — май).

Ожидается, что изменение климата в целом негативно повлияет на сельское хозяйство, лесоводство и рыболовство в большинстве районов Бурунди, включая такие наиболее часто встречающиеся экстремальные природные явления, как наводнения и засухи, хотя в некоторых регионах может привести к повышению уровня осадков и улучшению других климатических параметров.

По данным Межправительственной группы по изменению климата, урожаи неорошаемых сельскохозяйственных культур в Бурунди и в других странах Африки к югу от Сахары могут упасть на 50 % к 2020 г. Изменение климата должно учитываться в общих рабочих планах по сельскому хозяйству и сокращению рисков, а потенциал для развития сельскохозяйственной технологии должен быть усилен. Особо острой является необходимость разведения сельскохозяйственных культур и пород скота, приспособленных к изменяющимся климатическим условиям, и внедрения инноваций по увеличению содержания органического вещества в почве[1].

1.1. Последствия изменения климата в Бурунди

Республика Бурунди выпустила два официальных документа о последствиях изменения климата в 2001 г и 2010. Оба документа были выпущены в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата и включают кадастр и прогнозы выбросов парниковых газов, меры по смягчению, а также уязвимости и меры адаптации к изменению климата. Они

также включают национальные сценарии изменения климата, основанные на модели MAGICC / SCENGEN3.

К 2050 году модель предсказывает увеличение количества осадков от 3 до 10% и повышение температуры на 0,4 °С каждые 10 лет (первое сообщение). Первый документ (документ выпущен в 2001) подтверждает повышение температуры и указывает на увеличение межгодовые колебания количества осадков в Бурунди.

Среди других ключевых документов последствиях изменения климата в Бурунди, цитируются Национальный план действий по адаптации к изменению климата (PANA) и Исследования уязвимости и адаптации к изменению климата (MEEATU). PANA позволяет определить основные потребности в адаптации и приоритетных мероприятий, которые должны быть выполнены в случае изменения климата. Он объединяет двенадцать приоритетных проектов, которые включают, например, улучшение сезонных прогнозов климата для раннего предупреждения или восстановления деградированной окружающей среды. Исследование уязвимости и адаптации к изменению климата было разработано с целью сбора информации об уязвимости сектора и адаптации к изменению климата в рамках подготовки ко второму национальному сообщению 2010 года. Наиболее уязвимыми секторами, определенными в исследовании, являются водные ресурсы и гидроэнергетика, сельское хозяйство и животноводство, водные и наземные экосистемы, а также сектор здравоохранения.

На основе климатической информации, доступной на международном и национальном уровнях, группа по анализу уязвимости разработала, в качестве первого шага анализа, исследование прогноза изменения климата на периоды 2031-2060 и 2071-2100 гг. и как эталонный период 1970-1999 гг.

Эти модели были запущены с использованием различных сценариев выбросов, называемых репрезентативными траекториями концентрации (RCP) (рисунок 1.1), которые обеспечивают различные предположения о моделях выбросов парниковых газов. В рамках этого исследования были

выбраны два RCP для широкого охвата общего антропогенного радиационного воздействия, варьирующего от низкого и среднего воздействия (RCP 4.5) до высокого (RCP 8.5)[1].

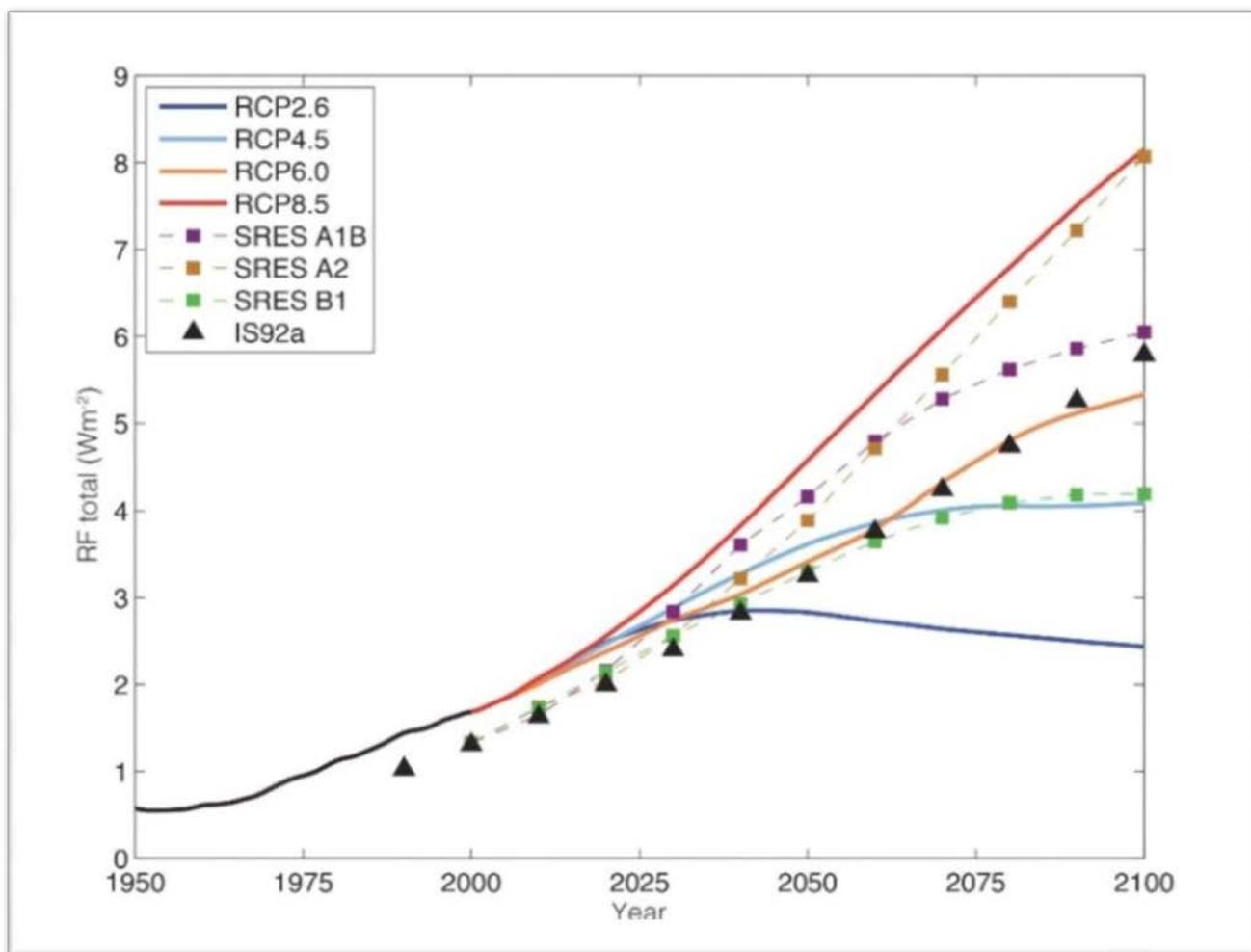


Рисунок 1.1–Антропогенное радиационное воздействие согласно различным RCP[1]

Эти прогнозы показывают значительное повышение температуры во все месяцы года, с 2 до 5 ° C в период с 2071 по 2100 годы, в зависимости от применяемой модели.

Также указано вероятностное увеличение годового количества осадков, особенно в ноябре и декабре. Это увеличение количества осадков будет более выражено на юге страны (рисунок1.2).

Если распределение осадков остается неопределенным, вероятно, что изменение климата также приведет к увеличению количества экстремальных явлений (дефицит или избыток осадков).

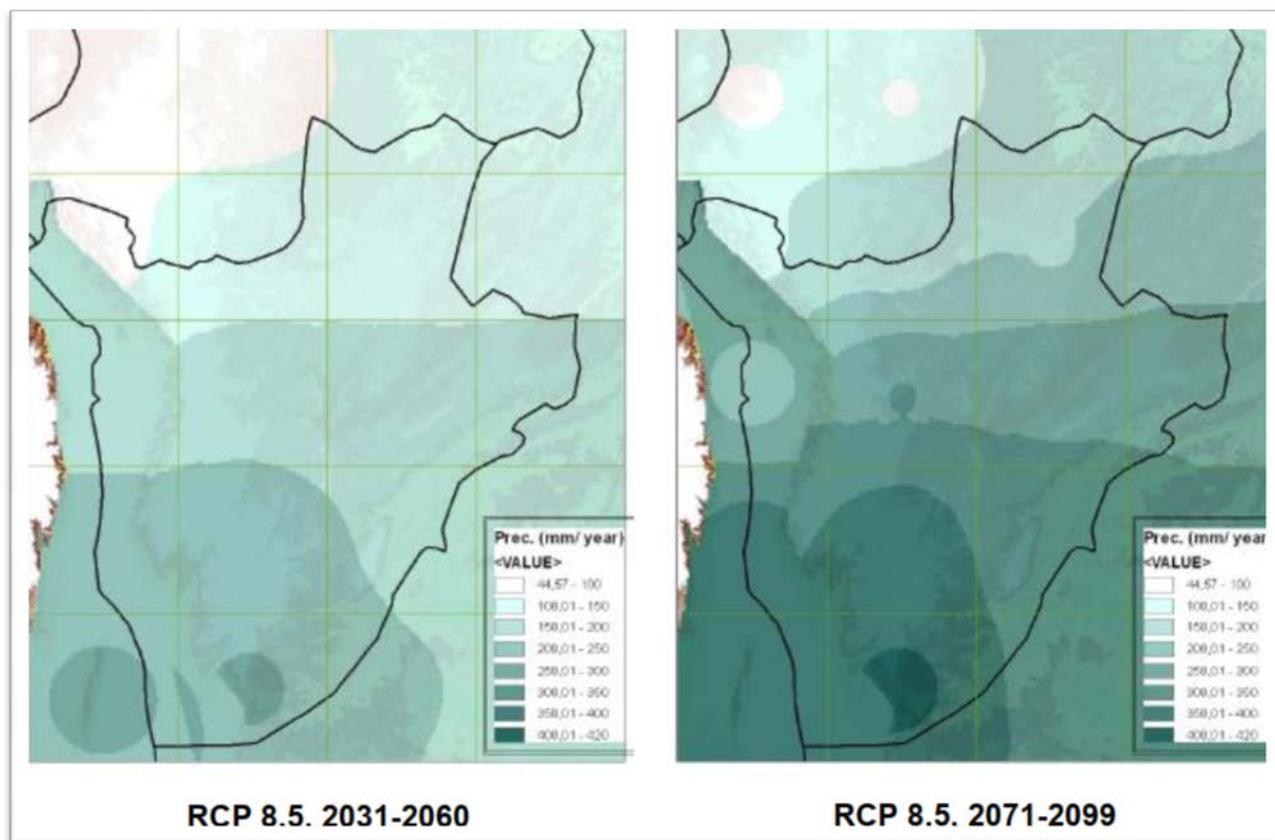


Рисунок 1.2 – Динамика годовых осадков (абсолютные значения), RCP 8.5[1]

Эти прогнозы климата используются в качестве индикаторов при анализе уязвимости на национальном уровне.

1.2. Карты уязвимости республики Бурунди

1.2.1. Карта уязвимости к эрозии

На рисунке 1.3 показана карта уязвимости к эрозии, соответствующая ситуации 2014 г. В нижней части показаны карта подверженности / модели, карта чувствительности и карта адаптивной мощности. Воздействие здесь

представлено моделью эрозии почвы, разработанной на основе модели «RUSLE».

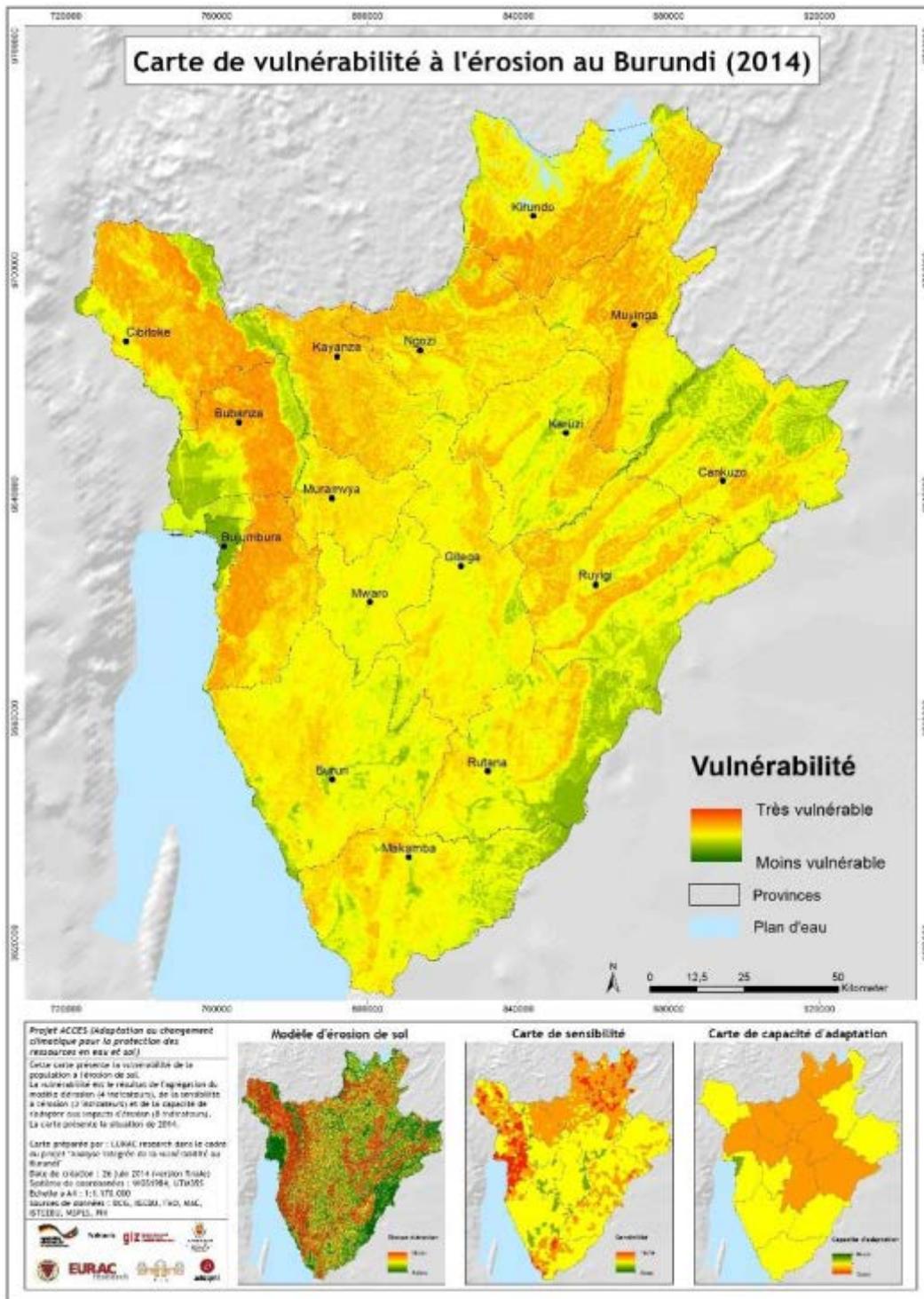


Рисунок 1.3 – Карта уязвимости Бурунди к эрозии (2014)[1]

Анализируя карту мы видим, что «очаги уязвимости» находятся на северо-западе и севере страны. Склон хребта (не непосредственно хребет!) к равнине Имбо на западе и топографические структуры на севере и на центральном плато представляют, в частности, регионы, наиболее уязвимые к эрозии. Причины – это, прежде всего, сильно выраженный рельеф, а также высокая чувствительность этих областей. Сравнивая три нижние карты рисунка 1.3 с картой уязвимостей, мы можем увидеть некоторые специфические явления:

- провинции Бужумбура, Бубанза и Чибитоке являются наиболее уязвимыми, поскольку они наиболее подвержены эрозии и наиболее чувствительны к ней;
- весь север страны имеет высокую чувствительность и низкую способность к адаптации, два аспекта, которые увеличивают уязвимость региона;
- провинция Бурури менее уязвима, чем другие провинции хребта из-за более низкой чувствительности (а здесь и плотности населения);
- город Бужумбура наименее подвержен риску эрозии; адаптивность этого города также самая высокая в стране;
- несмотря на крутые склоны, риск эрозии в Национальном парке Кибира ниже из-за растительного покрова – естественного леса, стабилизирующего почву;
- административные ограничения иногда очень подчеркнуты, например, между провинцией Бужумбура и провинцией Бурури. Даже если природные условия в этих двух провинциях не меняются (как показывает модель эрозии почвы), карта показывает меньшую уязвимость в Бурури, чем в сельской Бужумбуре, из-за разной уязвимости. В общем, разрешение карт можно улучшить с помощью более точных данных, поскольку большая часть используемых данных в основном доступна на уровне провинции.

На двух картах уязвимости, приведённых на рисунке 1.4, показаны прогнозы уязвимости к эрозии на периоды 2031-2060 и 2071-2099 и RCP 8.5, основанные на климатической модели для Бурунди[1].

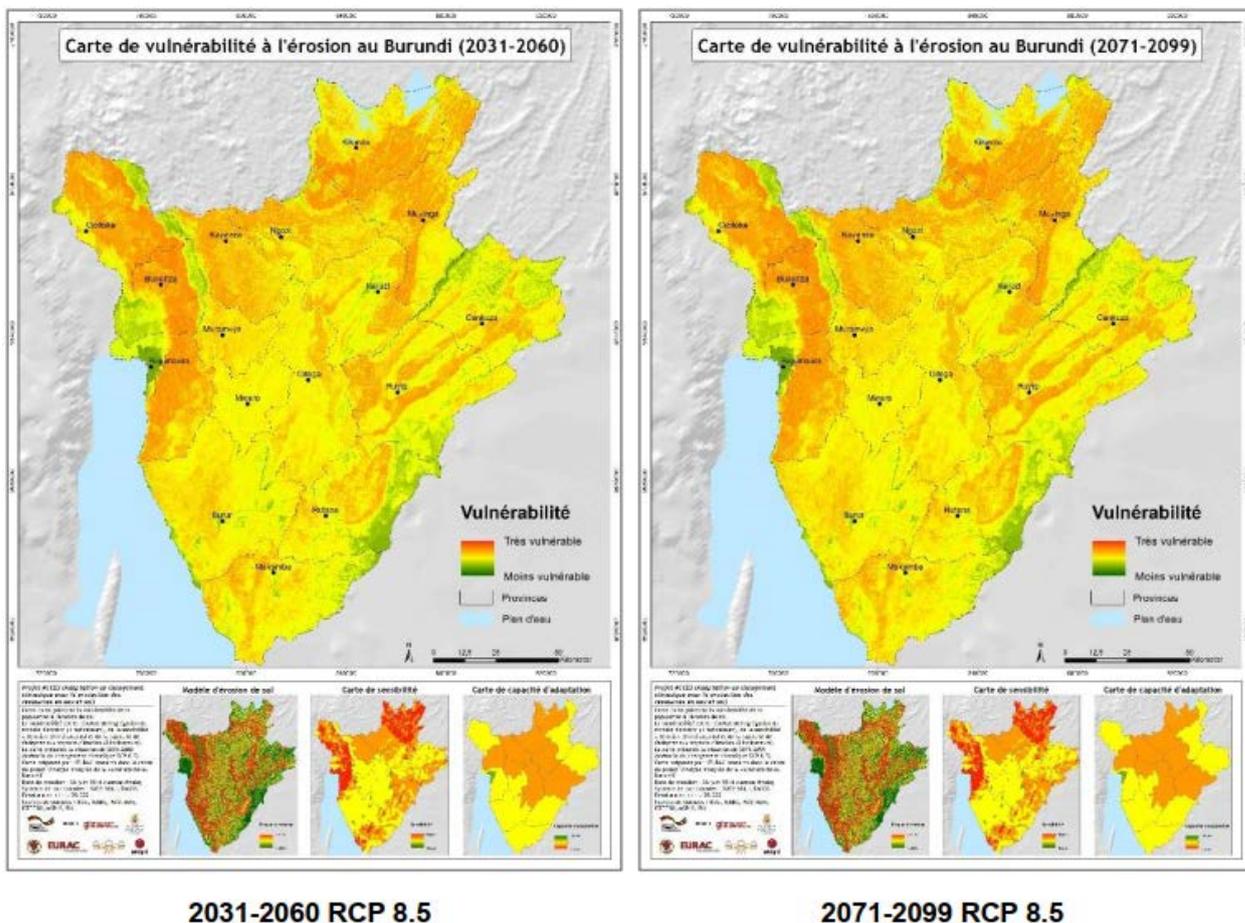


Рисунок 1.4 –Карты уязвимости Бурунди к эрозии 2031-2060 и 2071-2099[1]

Сравнивая прогнозы с картой 2014 года (рисунок 1.3), мы не видим больших изменений с точки зрения уязвимости. Повышается уязвимость только на северо-западе и северо-востоке (особенно в Кирундо). Это различие связано с увеличением плотности населения и, следовательно, с более высокой чувствительностью в регионе. Однако модель эрозии почвы почти не показывает различий между 2014 г. и прогнозами уязвимости. Фактически, только фактор «R» (изменение количества осадков) модели RUSLE мог быть рассчитан для прогнозов с использованием данных климатической модели. Однако при оценке водной эрозии почвы необходимо

принимать во внимание не только количество дождя, но и его агрессивность – его кинетическую энергию и интенсивность. Но эти два аспекта не включены в климатическую модель. Их невозможно представить в модели из-за сложности параметров и слишком мелких вариаций на пространственном и временном уровне для получения соответствующих результатов из модели. Для этого модель не покрывает также экстремальные погодные явления [1].

В целом надежность карты эрозионной уязвимости высока. Обсуждения с местными экспертами подтвердили, что карты эрозии отражают реальность в Бурунди. Также актуальны данные, используемые при моделировании, в частности цифровая модель местности. Проблемы связаны, главным образом, с пространственным разрешением данных для чувствительности и адаптивной способности, что не позволяет более точно представить уязвимость (например, высокая видимость административных границ), а также невозможность проецировать некоторые данные (например, агрессивность дождя, адаптивная способность и т. д.) [1].

1.2.2. Карта уязвимости к засухе

На следующей карте, представленной на рисунке 1.5, показана уязвимость к засухе на 2014 год. В нижней рамке также показаны карты подверженности, чувствительности и адаптивной способности. Подверженность засухе представлена моделью наличия воды, разработанной на основе гидрологической модели «SWIM» [1].

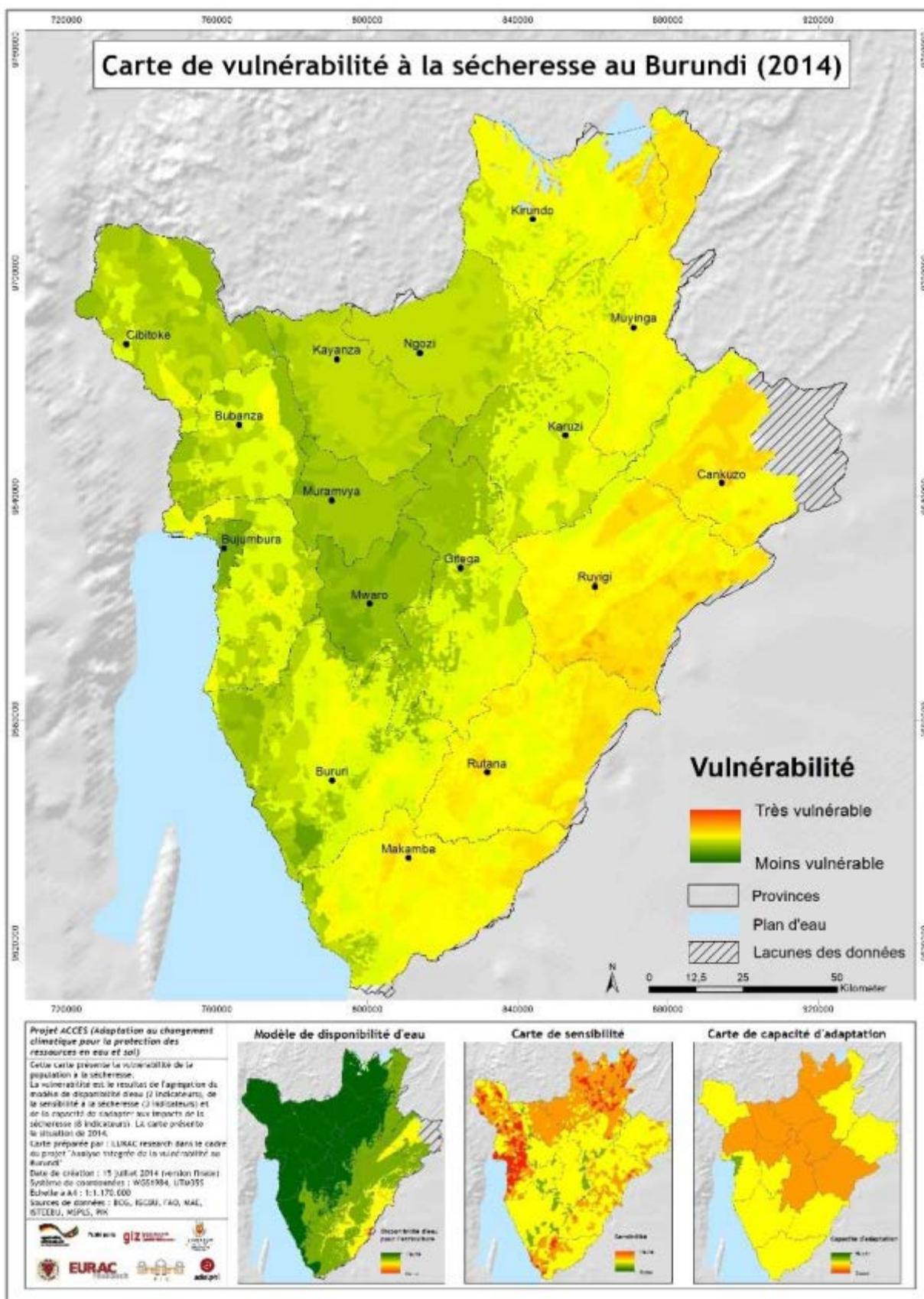


Рисунок 1.5 – Карта уязвимости к засухе в Бурунди (2014) [1]

Мы видим, что уязвимость Бурунди к засухе в целом менее выражена, чем, например, уязвимость к эрозии. Модель доступности воды (нижний левый угол карты) заметно отражает довольно благоприятную ситуацию для большей части страны. Если мы сравним различные регионы Бурунди, окажется, что уязвимость перед засухой наиболее заметна на юго-востоке и северо-востоке страны. С другой стороны, центральное плато и запад Бурунди менее уязвимы. Этот градиент между юго-востоком и северо-западом страны также заметен в модели доступности воды, но северо-восток более влажный, чем юго-восток Бурунди. Таким образом, уязвимость северо-востока также связана с более высокой чувствительностью к засухе в этом регионе[1].

Следующие две карты показывают уязвимость к засухе для прогнозов иСценарий RCP 8.5:

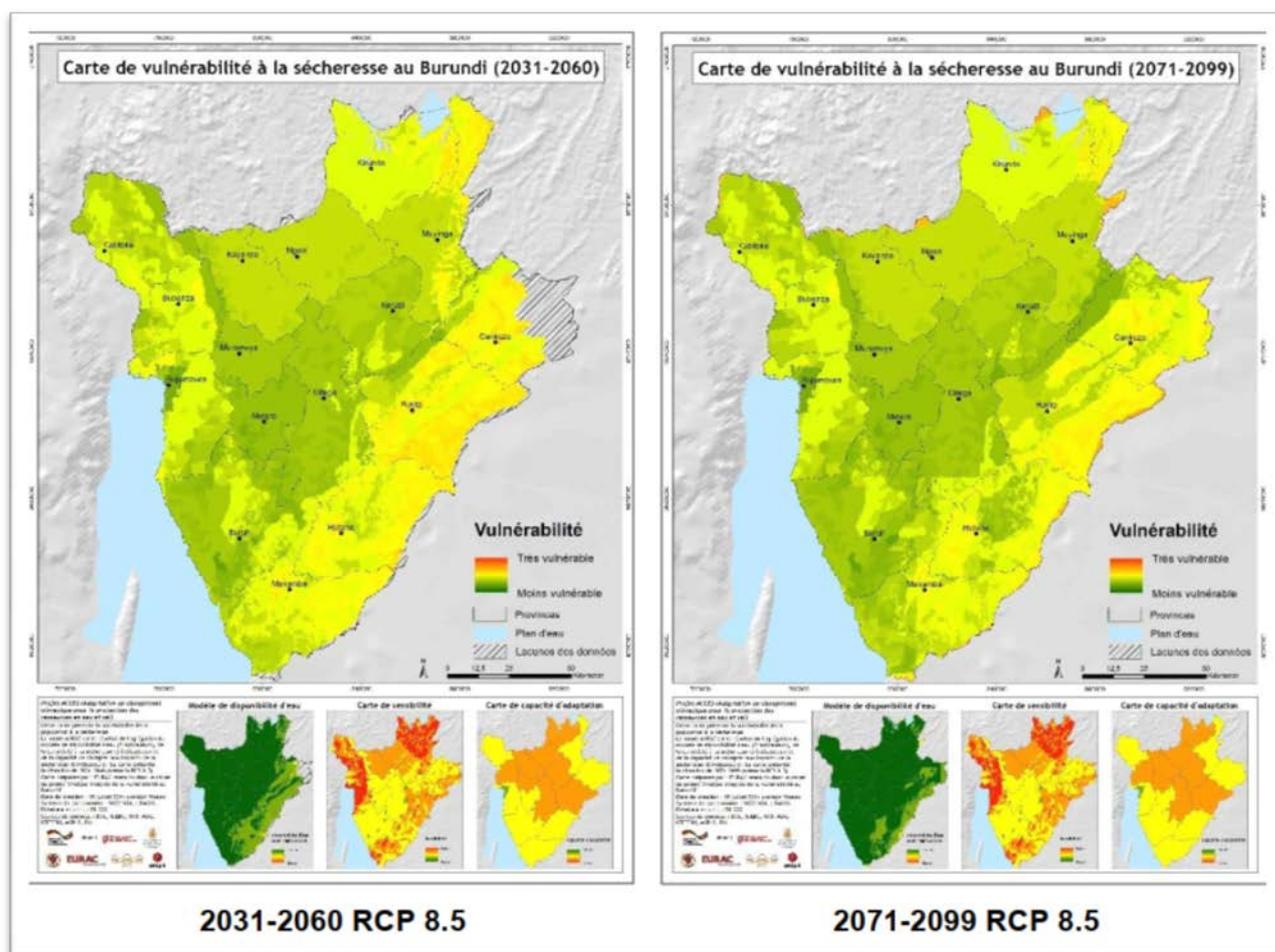


Рисунок 1.6 – Карты уязвимости Бурунди к засухе 2031-2060 и 2071-2099[1]

Прогнозы показывают, что количество доступной воды будет продолжать расти по всей стране. В последний период 2071-2099 гг. Почти вся Бурунди будет иметь достаточное количество воды для сельского хозяйства. Только чувствительность и способность к адаптации будут способствовать повышению уязвимости. Хотя чувствительность возрастает на северо-востоке и северо-западе страны, уязвимость снижается по сравнению с ситуацией 2014 года из-за избытка воды. Модель доступности сильно способствует представлению низкой уязвимости к засухе по всей стране. Однако следует отметить, что модель показывает только наличие воды в течение года, но не может указать ее распределение в течение года. Следовательно, весьма вероятно, что доступность воды как таковая будет увеличиваться в течение всего года, но она показывает реальные ежемесячные колебания в течение года с более неблагоприятными последствиями.

Из-за невозможности использования климатических данных для правильного предсказания месячной и недельной изменчивости количества осадков или засуха, необходимо использовать гидродинамические модели погоды. [2]

2. Метод исследования «Модель WRF-ARW»

WRF - это мезомасштабная модель с произвольным разрешением (в зависимости от выбора каждого), которая позволяет решать прогностические уравнения. Она обладает возможностью использовать много уровней по вертикали. Версия динамического ядра NCAR, называемая ARW (AdvancedResearch WRF), направлена на улучшение знаний в области атмосферного моделирования. Оперативная версия называется Негидростатическая мезомасштабная модель (NMM) с разрешением 4 км по небольшим географическим районам, чтобы лучше разрешать грозы. Она используется в некоторых офисах Национальной метеорологической службы для прогнозирования сильных гроз.

В данном исследовании была использована модель с динамическим ядром ARW – WRF ARW

- WRF ARW является одним из двух вариантов мезомасштабной модели WRF.
- Модель основана на упругих негидростатических уравнениях движения для сжимаемой жидкости.
- Вертикальной координатой модели является σ . Поверхности равных значений σ у нижней границы области моделирования следуют за рельефом, при приближении к верхней границе становятся близкими к поверхностям равного давления.
- Уравнения движения дискретизируются на пространственной сетке Аракавы класса «С» и интегрируются по времени методами Рунге-Кутты третьего и второго порядка с использованием метода расщепления.
- Группам подсеточных процессов соответствуют по несколько вариантов параметризаций различной степени сложности.

2.1. Схема дискретизации уравнений движения на пространственной сетке Аракавы класса «С»

Сетка модели, используемая в исследовании, представлена на рисунке 2.1.

По вертикали используется расшатанная сетка Лоренца (рисунок 2.1 правая панель).

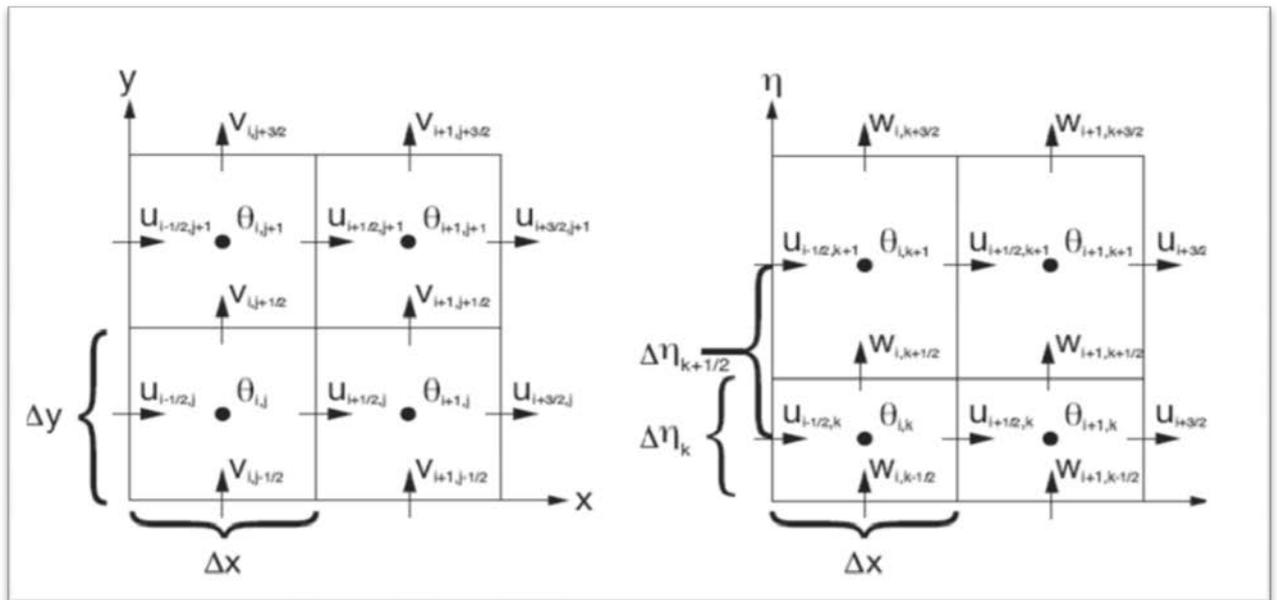


Рисунок 2.1– Горизонтальная сетка «С» Аракавы (левая панель) и расшатанная по вертикали сетка (правая панель)

На рисунке 2.2 представлена схема использования метода Рунге-Кутты при интегрировании уравнений движения с использованием расщепления по времени.

3rd Order Runge-Kutta time integration

$$\begin{array}{l}
 \frac{\partial U}{\partial t} = RHS_u \\
 \frac{\partial V}{\partial t} = RHS_v \\
 \frac{\partial W}{\partial t} = RHS_w \\
 \vdots \\
 \vdots
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 \text{advance } \phi^t \rightarrow \phi^{t+\Delta t} \\
 \phi^* = \phi^t + \frac{\Delta t}{3} RHS(\phi^t) \\
 \phi^{**} = \phi^t + \frac{\Delta t}{2} RHS(\phi^*) \\
 \phi^{t+\Delta t} = \phi^t + \Delta t RHS(\phi^{**})
 \end{array}$$

Amplification factor $\phi_i = ik\phi$; $\phi^{n+1} = A\phi^n$; $|A| = 1 - \frac{(k\Delta t)^4}{24}$

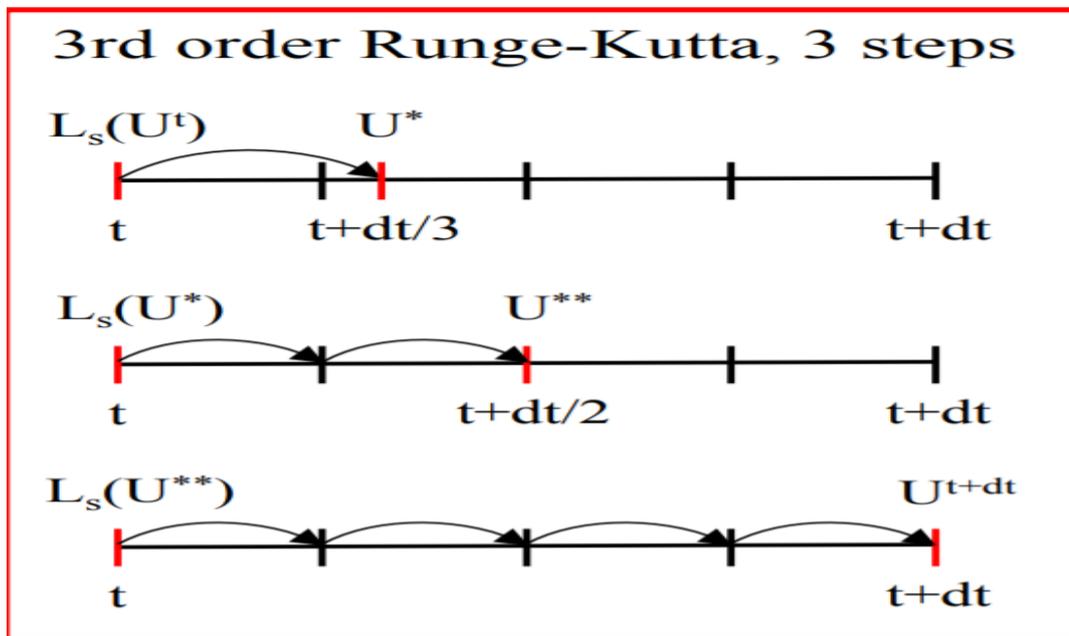


Рисунок 2.2 – Схема метода Рунге-Кутта

Для обеспечения точности модели WRF-ARW при прогнозировании различных опасных явлений, существует возможность параметризации микрофизических элементов, которые оказывают влияние на изменении погодных условий в определенном районе.

2.2. Начальные данные

- При счете WRF ARW используются данные глобального анализа и прогнозы модели NCEP.
- Начальные данные загружаются с сервера NCEP: <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov>. Возможно использование и данных их других источников, например, результата анализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды. В данном исследовании используются данные NCEP.
- Глобальные прогнозы NCEP доступны от сроков: 00, 06, 12, 18 ВСВ и используются для постановки граничных условий.

2.3 Структура модели WRF ARW

Модель WRF ARW состоит из нескольких кластеров, общая схема взаимодействия которых приведена на Рисунке 2.3.

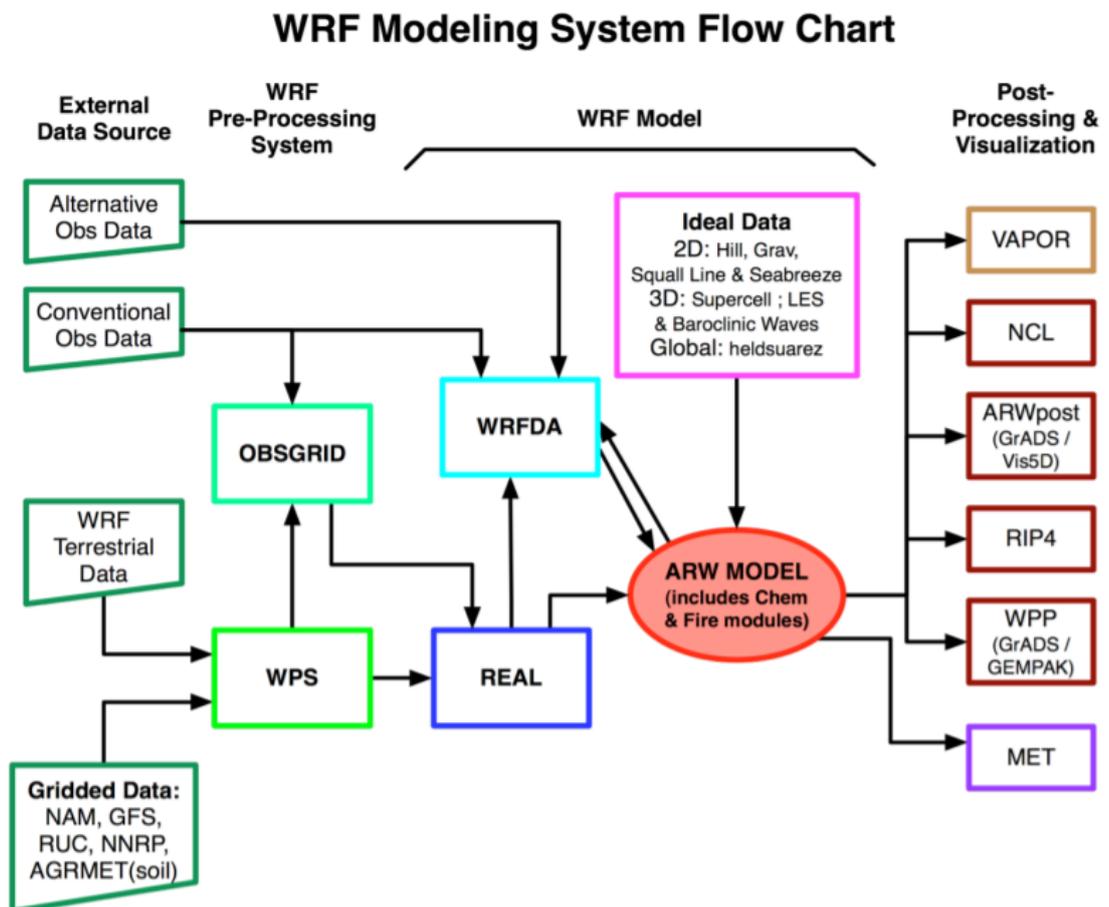


Рисунок 2.3 – Общая схема взаимодействия элементов модели WRF [2]

Первая часть программного блока – WRF PreprocysingSystem (WPS) – занимается предварительной обработкой (подготовкой), приведением данных к нужному формату. WPS состоит из трех блоков:

- Geogrid – происходит определение размеров рабочих областей, интерполяция географических и статических данных в узлы сетки.

- Ungrib – происходит извлечение метеорологических данных из формата GRIB (GRIB2)

- Metgrid – происходит интерполяция извлеченных Ungrib’ом метеорологических полей в заданную Geogrid’ом сетку. Модель позволяет проводить расчеты как с реальными данными – за что отвечает блок

Real – так и с «идеальными» случаями (блок Ideal). Блок Real инициализирует начальные данные, производит вертикальную интерполяцию, «заготавливает» граничные условия для материнской сетки на срок прогноза.

После использования Real, может быть подключен блок WRF DataAssimilation

(WRFDA). WRFDA – это блок трехмерного вариационного усвоения данных наблюдений (для обычных, спутниковых и радиолокационных наблюдений).

Далее следует собственно динамическое ядро модели - ARW, осуществляющее все вычисления и подключающее указанные на входе необходимые параметры, как-то параметризации.

После успешного выполнения программы динамического ядра формируются выходные файлы, которые могут быть визуализированы при помощи различных средств [2].

2.3. Гидродинамические прогнозы для республики Бурунди с помощью модели WRF-ARW

Для прогноза внезапных изменений погоды была использована гидродинамическая мезомасштабная модель WRF-ARW [2]. Прогноз разрабатывался в области от 2,1° до 4,8° южной широты и от 28,5° до 31,2° восточной долготы, где находится Бурунди. Шаг по горизонтали 3.5 км, шаг по времени 30 секунд, начальные данные получают из результатов реанализа NCEP/NCAR [2, 3], граничные условия обновляются каждые 6 часов.

Были проведены предварительные численные эксперименты по определению оптимального набора параметризаций физических процессов. В результате получено, что лучшими для решения поставленной задачи являются следующие параметризации

Микрофизика – WRF одномоментная микрофизика 6-го класса [3];

Длинноволновая радиация – схема RRTM [3];

Коротковолновая радиация - схема Дудья [3];

Приземный слой - схема Монины-Обухова [3];

Почвенные процессы - схема Noah [3];

Пограничный слой - схема университета Yonsei [3];

Конвекция – схема ансамбля Грелла в 3D [3];

Численные эксперименты по прогнозу для территории Бурунди проводились для сухого (июль 2018 года) и влажного (апрель 2018 года) периодов.

Верификация результатов осуществлялась по данным метеорологических станций Бужумбуры, Ругийги, Мусаса и Гитеги. Оценивалось качество прогноза приземного давления, максимальной, минимальной и среднесуточной температуры воздуха на уровне 2 метра, количества осадков.

Основные характеристики модели WRF-ARW, используемые при прогнозе на территории Бурунди:

- Шаг по пространству: $dx = dy = 3,5 \text{ km}$
- Шаг по времени: 30 секунд
- Количество узлов: 8820
- Количество уровней по вертикале: 24
- Количество уровней по горизонтали: 99 по x; 91 по y
- Количество моментов времени: 7
- Заблаговременность прогнозов: 36 часов
- Число прогнозов сделанных для апреля и июля 2018 на станции

Бужумбура: 122.

После успешного выполнения программ динамического ядра формируются выходные файлы, которые были обработаны с помощью написанных на языке программирования Фортран программ, а также с использованием MS Excel и OpenGrads.

В результате этого был осуществлён анализ прогнозов, построены графики сравнения фактических и прогностических данных над Бурунди за апрель и июль 2018.

3. Оценка качества гидродинамического прогноза для Бурунди

3.1. Оценка качества гидродинамического прогноза для станции Бужумбура

3.1.1. Оценка гидродинамического прогноза температуры на станции Бужумбура

Оценивалось сначала качество прогноза минимальной и максимальной температуры воздуха. Оценка проводилась сравнением фактического значения на станции с прогностическим значением температуры в ближайшем узле сетки.

На рисунке 3.1 представлена гистограмма, на которой показана частота попадания в интервал значения минимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбура. По этой гистограмме минимальная температура, которая наблюдается, с большой вероятностью находится в диапазоне от 22⁰с до 23⁰с и появляется 16 раз по факту и 12 по результатам прогнозирования с помощью модели WRF-ARW.

По этой же гистограмме видно, что с меньшей вероятностью наблюдается по факту минимальная температура в диапазон от 19⁰с до 20⁰с. Модель прогнозирует минимальную температуру с меньшей вероятностью появления и те значения, которые не наблюдаются по факту.

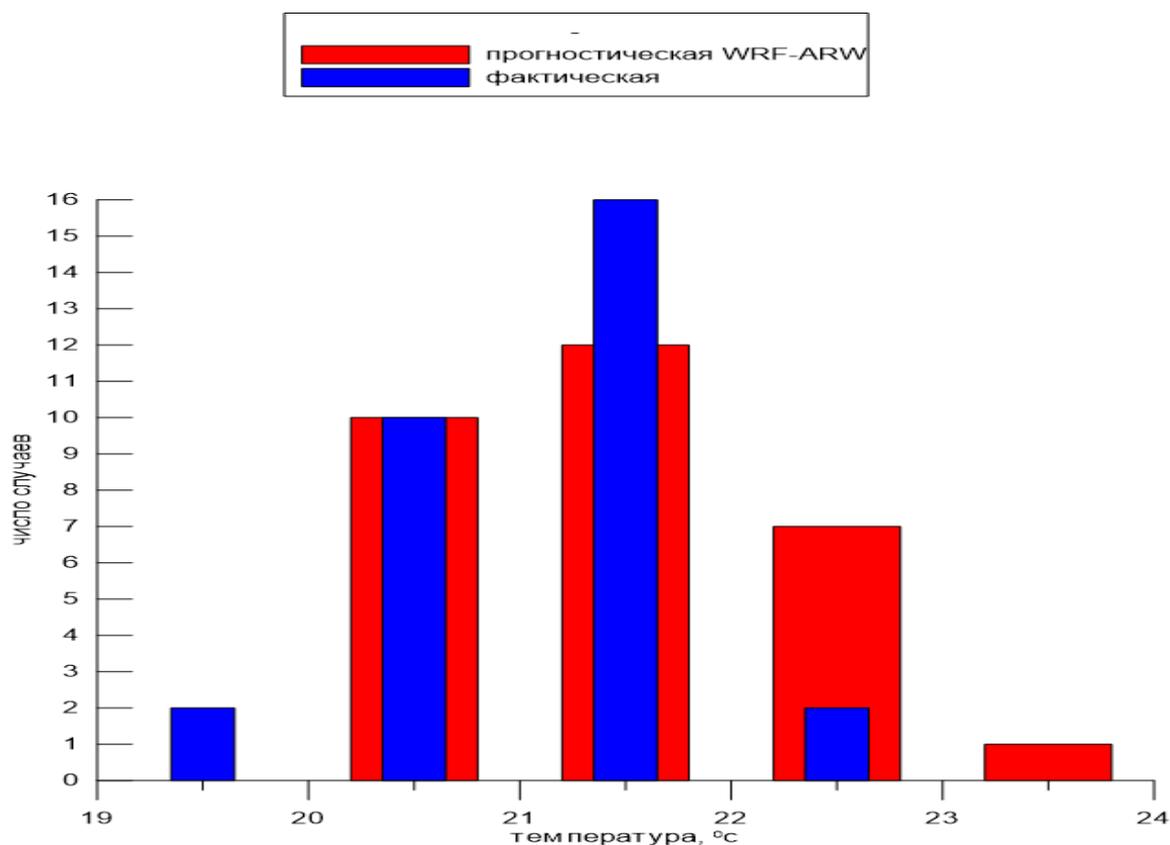


Рисунок 3.1 - Изменение минимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбура

На рисунке 3.2 представлена гистограмма, на которой показана частота появления значения ошибки прогнозирования минимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбура с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. На этой гистограмме ошибка прогнозирования минимальной температуры, которая наблюдается с большой вероятностью, находится в диапазоне от 0⁰с до 1⁰с и появляется 14 раз. По этой же гистограмме видно, что с меньшей вероятностью наблюдется ошибка прогнозирования минимальной температуры в диапазон от 2⁰с до 3⁰с и наблюдается только один раз в протяжении всего месяца.

Анализ результатов моделирования позволяет говорить о том, что прогноз произошел успешно 29 раз из 30 случаев согласно руководствующим документам по осуществлению краткосрочных прогнозов погоды, который

считает прогноз оправдавшимся в случае, если ошибки прогноза не превышают 2°C [4].

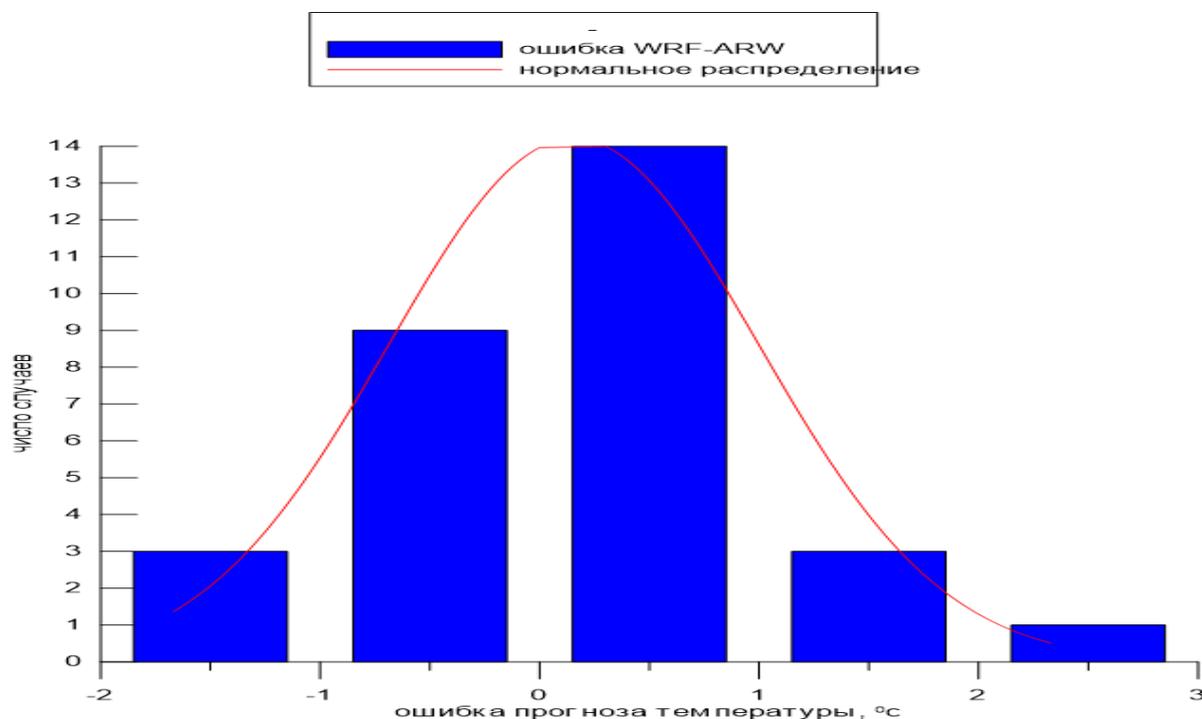


Рисунок 3.2 – Изменение ошибок минимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбура.

Дисперсионный анализ между фактическими и прогностическими данными минимальной температуры показывает, что межгрупповая дисперсия равняется 0,00602 и характеризует систематическую вариацию минимальной температуры между фактическим и рядом прогностических температуры.

Дисперсия фактической минимальной температуры составляет 0.47, и дисперсия прогностической минимальной температуры составляет 0.61. В связи с тем, что дисперсия прогностических данных больше дисперсии фактических данных, можно сделать вывод о том, что прогноз минимальной

температуры в апреле 2018 на станции Бужумбуру прогнозирует больший диапазон значений, чем наблюдается фактически.

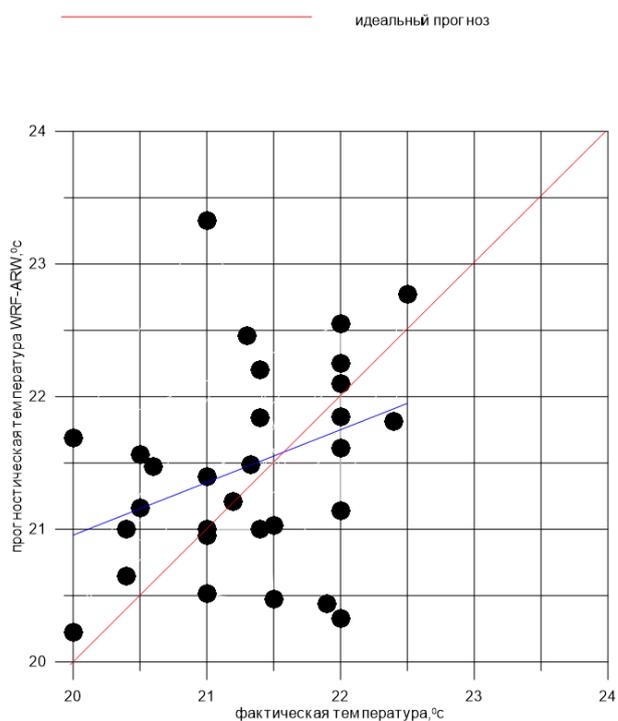


Рисунок 3.3 – Диаграмма рассеивания минимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбура

На рисунке 3.3 представлена диаграмма рассеивания, на которой показано как произошел бы идеальный прогноз, если не было бы ошибки в прогнозе с мезомасштабной модели WRF-ARW.

На диаграмме синяя линия показывает изменение температуры по прогнозу модели WRF-ARW.

Таблица 3.1 – Среднее значение минимальных температур и дисперсия в апреле 2018 на станции Бужумбура

фактическая средняя температура	21,33 ⁰ C
прогностическая средняя температура	21,5 ⁰ C
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	21.4 ⁰ C
Межгрупповая дисперсия	0.006
Дисперсия фактической минимальной температуры	0.474
Дисперсия прогностической минимальной температуры	0.612

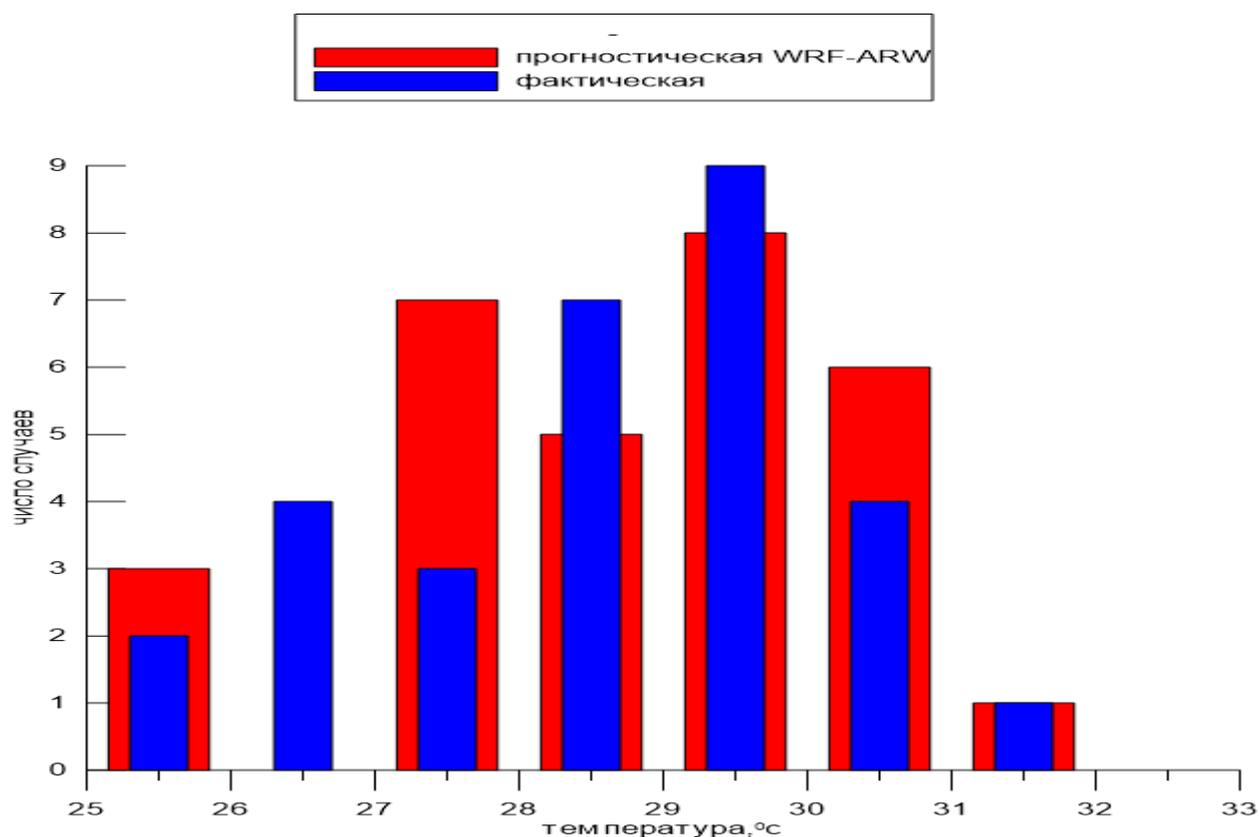


Рисунок 3.4 – Изменение максимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбура.

На рисунке 3.4 представлена гистограмма, на которой показана частота появления значения максимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбура. На гистограмме максимальная температура, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от 29⁰с до 30⁰с и появляется 9 раз по факту и 8 по результатам прогнозирования с помощью модели WRF-ARW. На этой же гистограмме видно, что с меньшей вероятностью наблюдается по факту минимальная температура в диапазон от 31⁰с до 32⁰с.

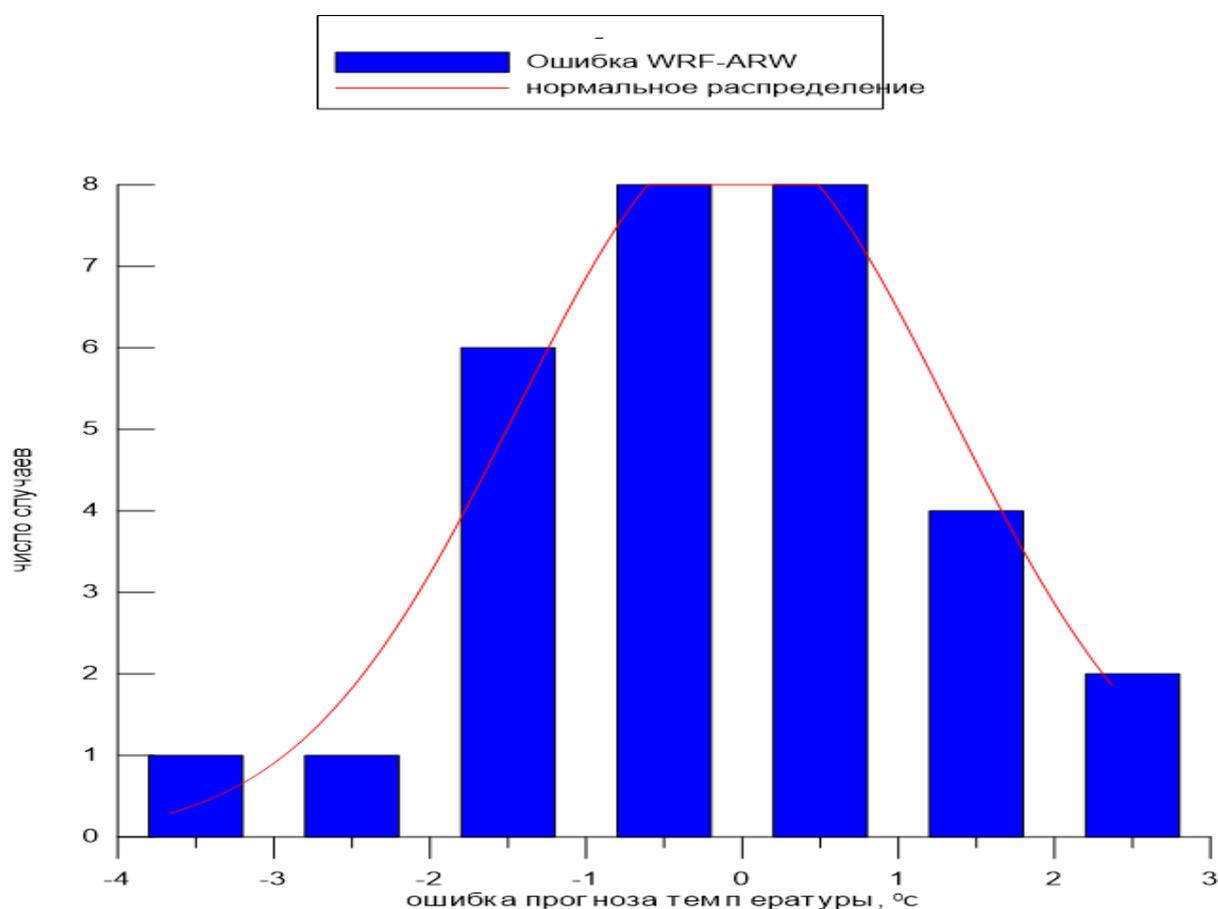


Рисунок 3.5 – Изменение ошибок максимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбура

На рисунке 3.5 представлена гистограмма, на которой показана частота появления значения ошибки прогнозирования максимальной температуры в

апреле 2018 на станции Бужумбура с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. На этой гистограмме ошибка прогнозирования минимальной температуры, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от -1°C до 0°C и 0°C до 1°C и появляется 16 раз. на этой же гистограмме видно, что большая ошибка прогнозирования максимальной температуры в диапазоне от 2°C до 4°C и наблюдается 4 раза в протяжении всего месяца и соответственно прогнозы не оправдались 4 раза в протяжении всего месяца.

Дисперсионный анализ между фактическими и прогностическими данными минимальной температуры показывает, что межгрупповая дисперсия равняет 0,00085 и характеризует систематическую вариацию минимальной температуры между фактическим и рядом прогностических температуры. Дисперсия фактической минимальной температуры составляет 2.01, и дисперсия прогностической минимальной температуры составляет 2.18. несмотря на то что дисперсия прогностических данных чуть-чуть больше дисперсии фактических данных, можно сделать вывод о том, что прогноз максимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбуру ближе к реальности.

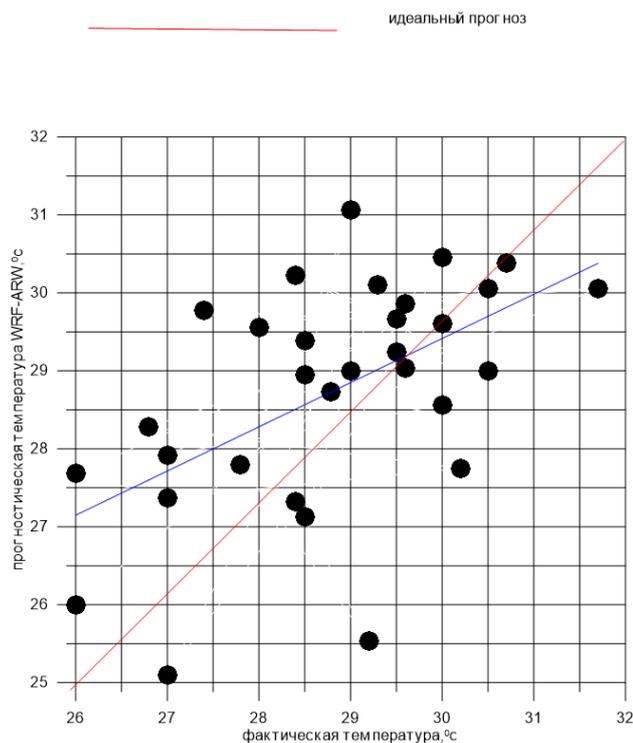


Рисунок 3.6 – Диаграмма рассеивания максимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбура.

На рисунке 3.6 представлена диаграмма рассеивания, на которой показано как произошел бы идеальный прогноз, если не было бы ошибки в прогнозе с мезомасштабной модели WRF-ARW. На диаграмме, Синяя линия показывает аппроксимацию зависимости фактической и прогностической по модели WRF-ARW температуры.

Таблица 3.2 –Среднее значение максимальных температур и дисперсия в апреле 2018 на станции Бужумбура

фактическая средняя температура	28.8 ⁰ С
прогностическая средняя температура	28.7 ⁰ С
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	28.8 ⁰ С
Межгрупповая дисперсия	0.00085 ⁰ С
Дисперсия фактической максимальной температуры	2.01382 ⁰ С

Дисперсия температуры	прогностической	максимальной	2.18564 ⁰ С
--------------------------	-----------------	--------------	------------------------

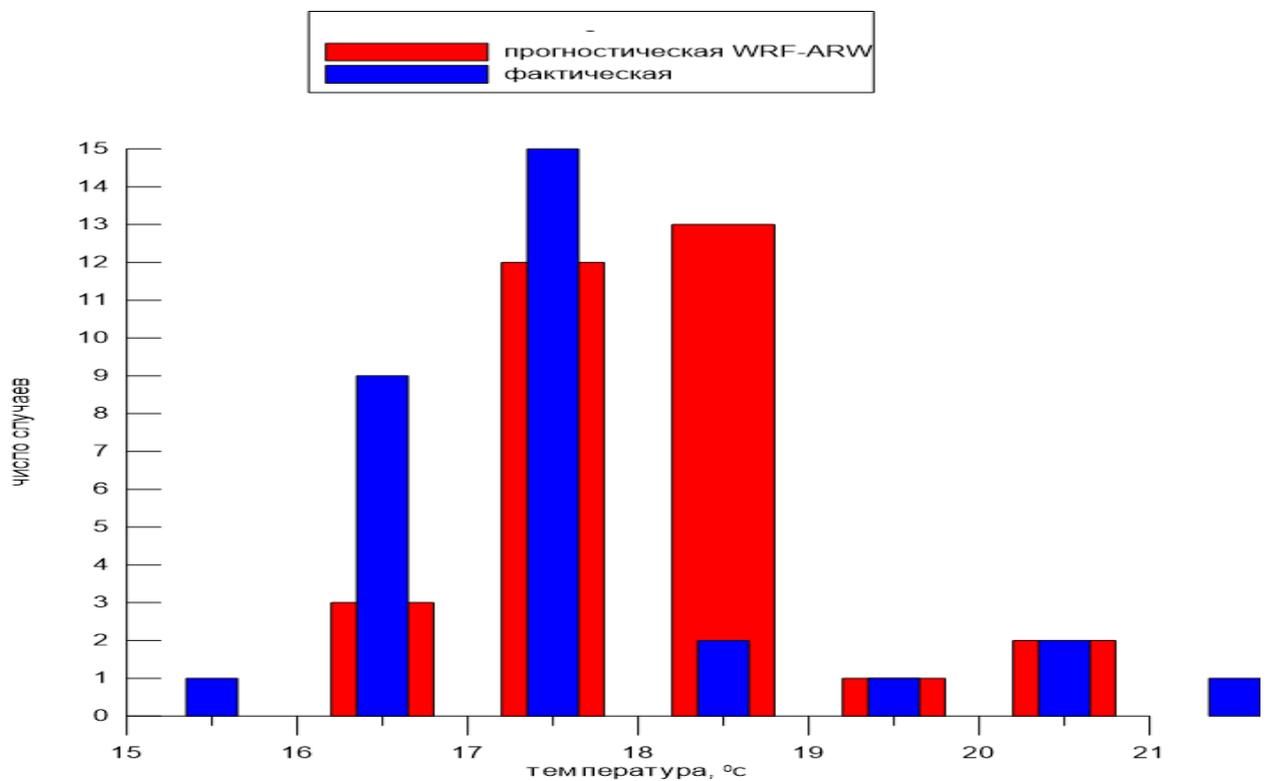


Рисунок 3.7 - Изменение минимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбура.

На рисунке 3.7 показана частота появления значения минимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбура. Фактические данные показывают, что минимальная температура, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от 17⁰с до 18⁰с и появляется 15 раз, но результаты прогноза с помощью модели WRF-ARW показывают, что минимальная температура, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от 18⁰с до 19⁰с и появляется 13 раз. По этой же гистограмме видно, что с меньшей вероятностью наблюдается по факту минимальная температура в диапазонах от 15⁰с до 16⁰с и от 21⁰с до 22⁰с.

Модель прогнозирует минимальную температуру с меньшей вероятностью появления в диапазоне от 19⁰С до 20⁰С

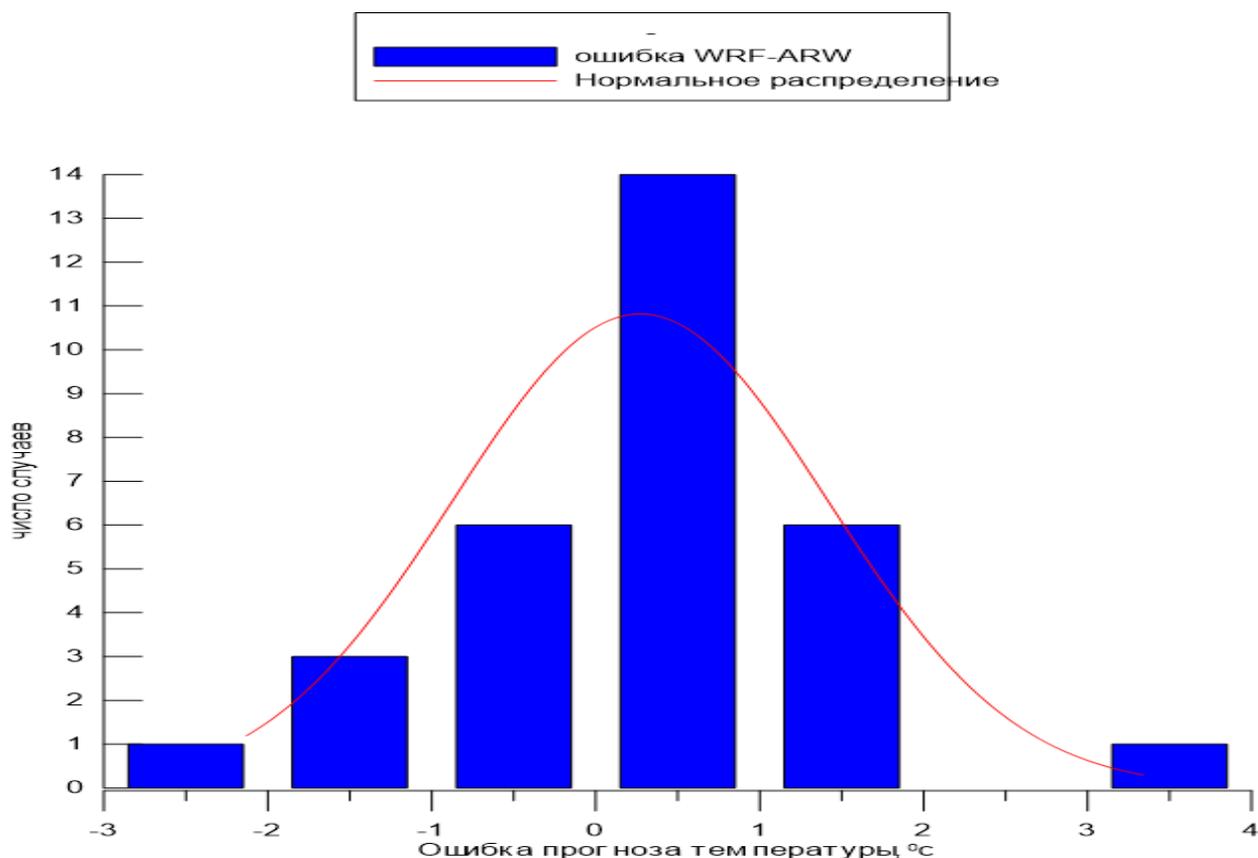


Рисунок 3.8 – Изменение ошибок минимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбура

На рисунке 3.8 представлена гистограмма, на которой показана частота появления значения ошибки прогнозирования минимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбура с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. Ошибка прогнозирования минимальной температуры, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от 0⁰С до 1⁰С и появляется 14 раз. Видно ещё, что с меньшей вероятностью наблюдается ошибка прогнозирования минимальной температуры в диапазонах от -3⁰С до -2⁰С и от 2⁰С до 3⁰С и наблюдается только два раз в протяжении всего месяца. Анализ результатов моделирования позволяет говорить о том, что прогноз произошел успешно 28 раз из 30 случаев.

Дисперсионный анализ между фактическими и прогностическими данными минимальной температуры показывает, что дисперсия равняется 0,0184 и характеризует систематическую вариацию минимальной температуры между фактическим и рядом прогностических температуры. дисперсия прогностической и фактической минимальной температуры соответственно составляют 0.819654475 и 1.634630593. в связи с тем, что дисперсия прогностических данных меньше дисперсии фактических данных, можно сделать вывод о том, что прогноз минимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбуру оправдался.

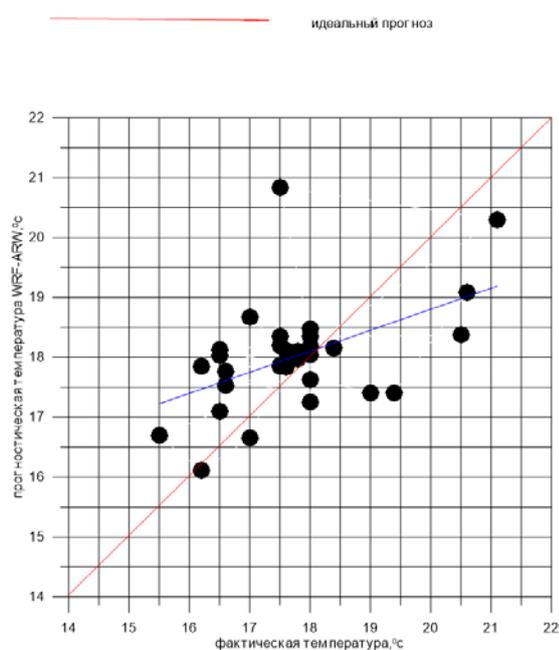


Рисунок 3.9 – Диаграмма рассеивания минимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбура

На рисунке 3.9 представлена диаграмма рассеивания, на которой показано как произошел бы идеальный прогноз если не было бы ошибки в прогнозе с мезомасштабной модели WRF-ARW. На диаграмме, Синяя линия

показывает изменение температуры по прогнозу модели WRF-ARW. Направление идеального прогноза не совпадает с направлением реального прогноза из-за ошибок, которые наблюдаются в результате прогнозирования.

Таблица 3.3 – среднее значение минимальных температур и дисперсия в июле 2018 на станции Бужумбура

фактическая средняя температура	18,0 °С
прогностическая средняя температура	17,7°С
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	17,°С
Межгрупповая дисперсия	0.018
Дисперсия фактической минимальной температуры	1.634
Дисперсия прогностической минимальной температуры	0.819

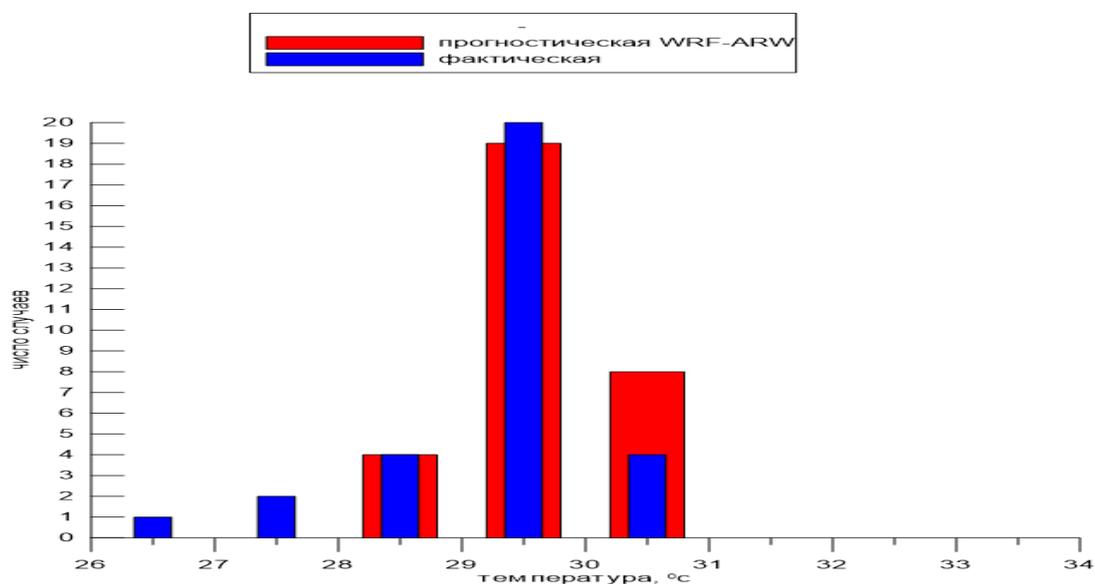


Рисунок 3.10 - Изменение максимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбура

На рисунке 3.10 представлена гистограмма, на которой показана частота появления значения максимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбура. На гистограмме максимальная температура, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от 29⁰с до 30⁰с и появляется 20 раз по факту и 19 по результатам прогнозирования с помощью модели WRF-ARW. На этой же гистограмме видно, что с меньшей вероятностью наблюдается по факту минимальная температура в диапазон от 26⁰с до 27⁰с.

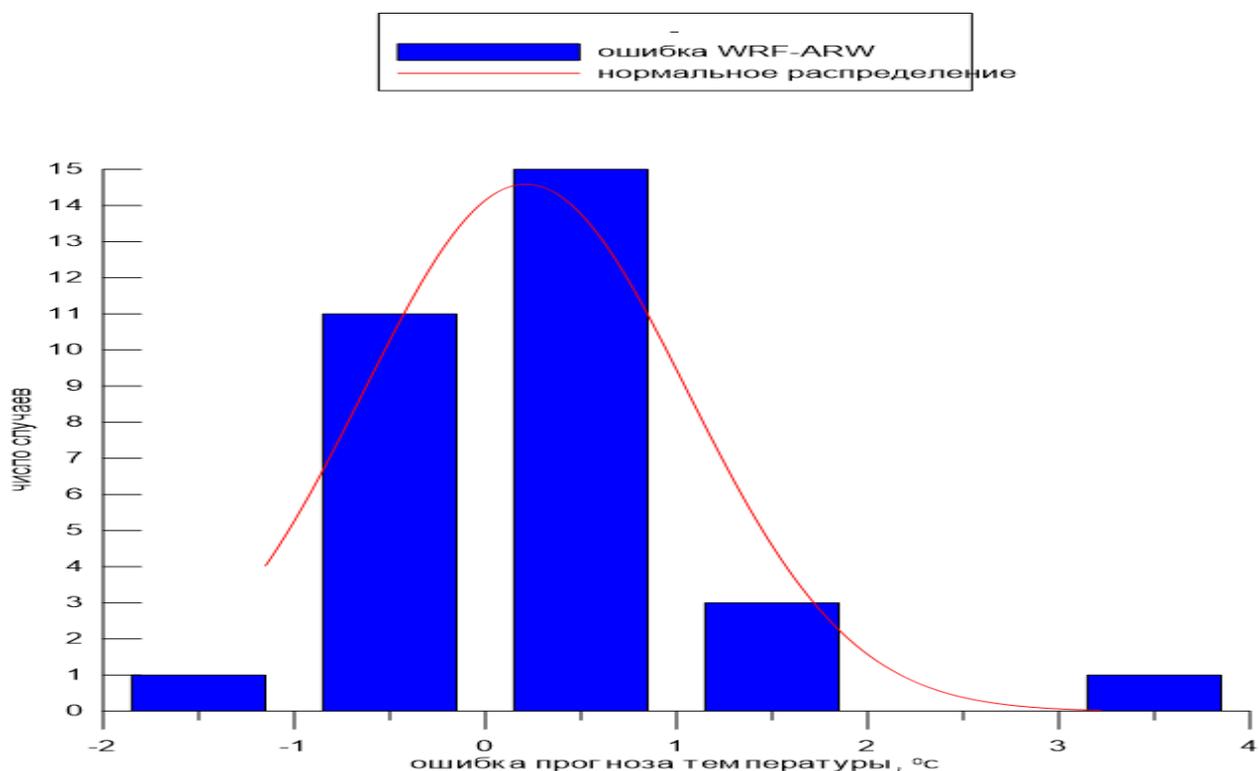


Рисунок 3.11 – Изменение ошибок максимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбура

На рисунке 3.11 представлена гистограмма, на которой показана частота появления значения ошибки прогнозирования максимальной температуры в апреле 2018 на станции Бужумбура с помощью

мезомасштабной модели WRF-ARW. На этой гистограмме ошибка прогнозирования минимальной температуры, которая приводит к неоправдываемости наблюдается только один раз в протяжении всего месяца и находится в диапазоне от 3⁰С до 4⁰С.

Дисперсия между фактическими и прогностическими данными минимальной температуры равняется 0.011076 и характеризует систематическую вариацию минимальной температуры между фактическим и рядом прогностических температуры. дисперсия прогностической и фактической максимальной температуры соответственно составляют 0.357674766 и 0.69483871. В связи с тем, что дисперсия прогностических данных меньше дисперсии фактических данных, можно сделать вывод о том, что прогноз максимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбуру оправдался.

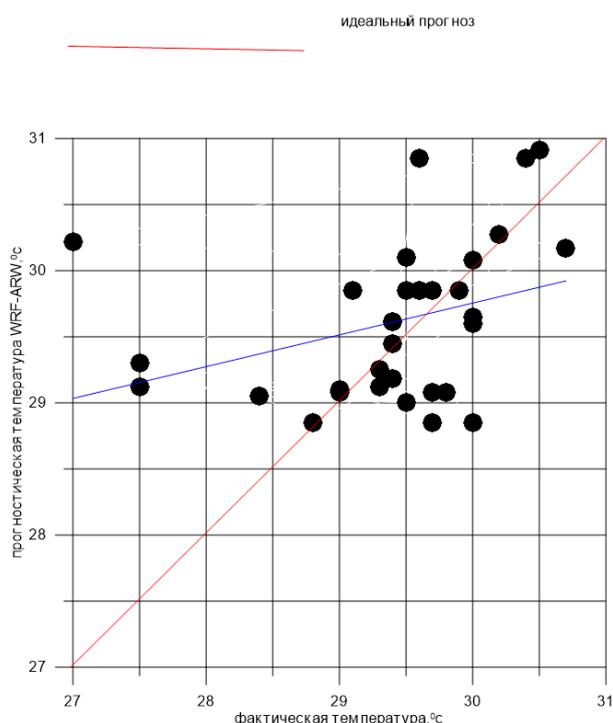


Рисунок 3.12 – диаграмма рассеивания максимальной температуры в июле 2018 на станции Бужумбура.

На рисунке 3.12 представлена диаграмма рассеивания, на которой показано как произошел бы идеальный прогноз если не было бы ошибки в прогнозе с мезомасштабной модели WRF-ARW. Направление идеального прогноза не совпадает с направлением реального прогноза из-за ошибок, которые наблюдаются в результате прогнозирований.

Таблица 3.4 – среднее значение минимальных температур и дисперсия в июле 2018 на станции Бужумбура.

фактическая средняя температура	29.4 ⁰ С
прогностическая средняя температура	29.6 ⁰ С
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	29.5 ⁰ С
Межгрупповая дисперсия	0.011
Дисперсия фактической минимальной температуры	0.695
Дисперсия прогностической минимальной температуры	0.358

3.1.2. Оценка гидродинамического прогноза количества осадков на станции Бужумбура

Для верификации прогнозов в данной работе рассчитаны статистические критерии, которые дают общее представление о качестве прогноза количества осадков. Рассчитанные статистические характеристики являются следующими:

- относительная ошибка (RE)
- средняя абсолютная ошибка (MAE),
- систематическая ошибка (ME)
- средняя квадратичная ошибка (RMSE)

-коэффициенты корреляции Пирсона (CORR) между прогностическими (P) и фактическими (F) полями метеорологических величин.

Построена матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений, с помощью которой рассчитаны следующие индексы:

- BIAS – отношение между количеством прогнозируемых событий и количеством наблюдаемых событий. Этот индекс демонстрирует завышение ($BIAS > 1$) или занижение ($BIAS < 1$) моделью количества наблюдаемых событий. $BIAS = 1$ означает совпадение числа прогнозируемых и наблюдаемых случаев осадков. BIAS не является мерой точности и необязательно $BIAS = 1$ соответствует идеальному прогнозу.

- POD – это доля станций, на которых правильно смоделированы осадки. Лучший результат соответствует $POD = 1$, а наихудший при $POD = 0$. $POD = 1$ означает идеальный прогноз.

- TS – это доля всех прогнозируемых или наблюдаемых событий, которые были правильными. лучший результат соответствует $TS = 1$, худший $TS = 0$; в этом случае $TS = 1$ означает идеальные прогнозы.

- GSS – что включает коррекцию воздействия ложных осадков – E. Значения GilbertSkillScore (GSS) колеблются от $-1/3$ до 1. При $GSS = 0$ результат моделирования осадков считается случайным, положительные значения GSS указывают на уровень точности прогноза, а идеальным прогноз осадков считается, когда GSS равняется 1.

Для оценки количества осадков, ещё построены гистограммы, на которой показаны диапазон изменения количества осадков и его частота. Также построены гистограммы изменения ошибок прогноза и диаграмма рассеивания.

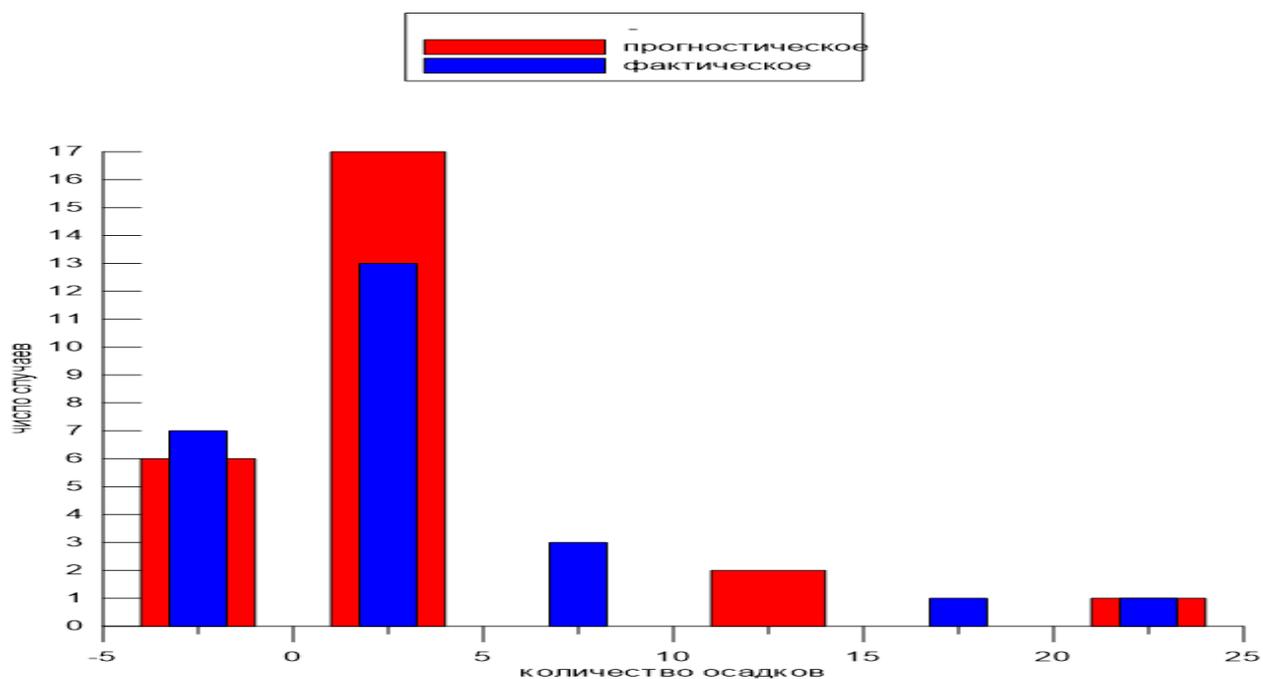


Рисунок 3.13 - Изменение количества осадков в апреле 2018 на станции Бужумбура

Гистограмма, приведённая на рисунке 3.13 показывает, что фактические и прогностические данные об осадках преимущественно иллюстрируют вероятностное количество осадков в диапазоне от 0 до 5 мм в сутки. Мало вероятностное количество осадков наблюдается в диапазоне от 20 до 25 мм за сутки.

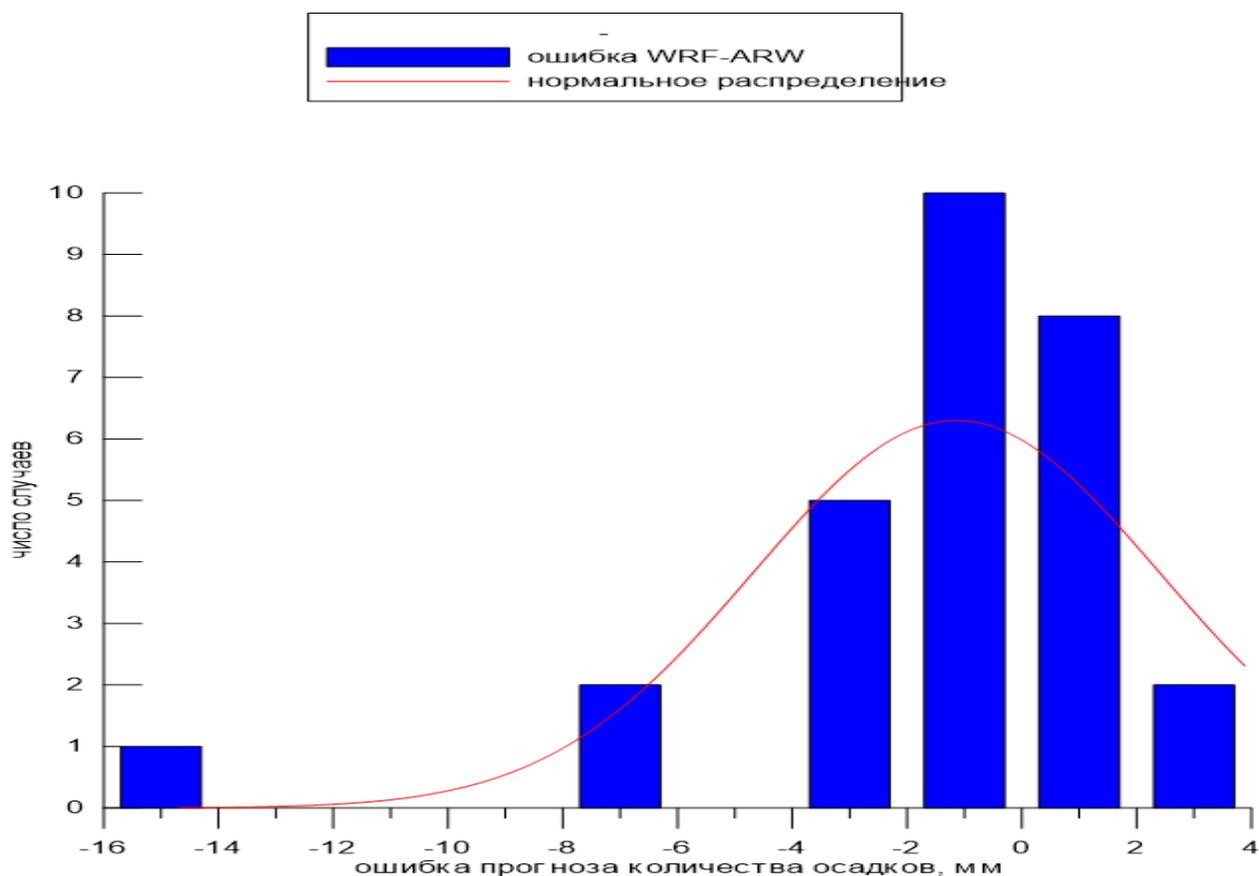


Рисунок 3.14 - Изменение ошибок прогноза количества осадков в апреле 2018 на станции Бужумбура

Гистограмма, показанная на рисунке 3.14 показывает, что фактические вероятностная ошибка прогноза количества осадков находится в диапазоне от 0 до 2 мм в сутки. Мало вероятностная ошибка прогноза количества осадков наблюдается в диапазоне от 14 до 16 мм за сутки. Дисперсия между фактическими и прогностическими данными осадков составляет 0.32689. Дисперсии прогностического и фактического количества осадков соответственно составляют 201.2724845 и 249.9030102.

Поскольку дисперсия прогностического количества осадков меньше дисперсии фактического количества осадков можно сделать вывод о том, что прогноз количества осадков в апреле на станции Бужумбура оправдался.

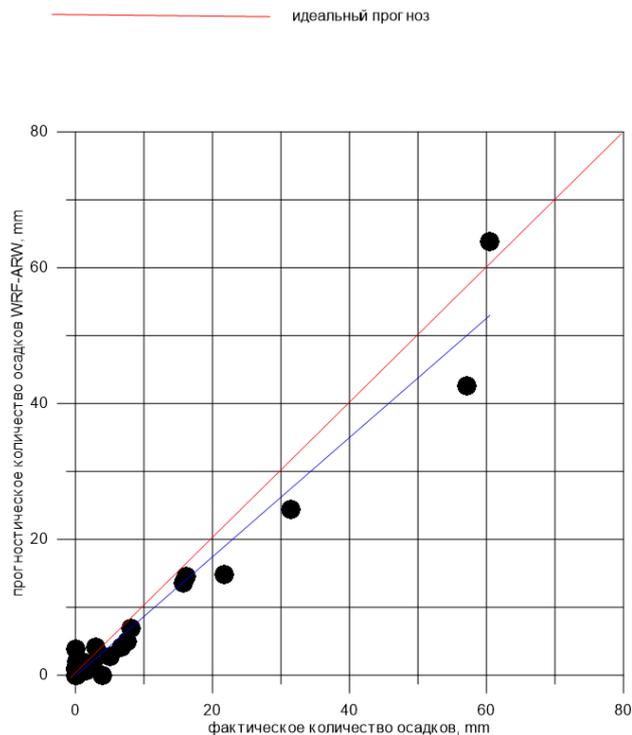


Рисунок 3.15 – Диаграмма рассеивания количества осадков в апреле 2018 на станции Бужумбура.

При анализе результатов, приведённых на рисунке 3.15, видно, что прогноз количества осадков успешен, поскольку линия идеального прогноза почти совпадает с линией реального прогноза с помощью модели WRF-ARW.

Таблица 3.5 –среднее значение количества осадков и дисперсия в июле 2018 на станции Бужумбура

фактическое среднее количество осадков	8.1 мм
прогностическая среднее количество осадков	6.9 мм
Дисперсия фактического количества осадков	15,8

Дисперсия прогностического количество осадков	14,2
Средняя ошибка	-1.14 мм

Таблица 3.6 – статистические критерии для оценки количества осадков в апреле 2018 на станции Бужумбура

статистические характеристики	значения
<i>ME</i>	-32.0
<i>MAE</i>	32.0
<i>RMSE</i>	19.7
<i>RE</i>	1301.5
<i>CORR_{P,F}</i>	0.98

По рассчитанным характеристикам для оценки качества прогноза количества осадков видно, что коэффициент корреляции имеет высокое значение. Согласно классификации коэффициентов корреляции по шкале Чеддока, связь между фактическими и прогностическими количествами осадков очень высокая и соответственно понятно, что ряд фактического и прогностического количества осадков очень сильно связаны и меняются в одном направлении.

В таблице 3.7 представлена матрица сопряженности для оценки результатов прогноза осадков на станции Бужумбура.

Таблица 3.7 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений в апреле 2018 на станции Бужумбура

		Наблюдение случая		
		ДА	НЕТ	
Прогноз		19	3	22

случая	А			
	ЕТ	2	4	6
		21	7	28

По данной матрице сопряженности, рассчитаны индексы, с помощью которых можно доказать качества прогнозирования количества осадков с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. Значения этих индексов представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 — индексы для оценки прогноза количества осадков в апреле 2018 на станции Бужумбура

Индексы	значения
BIAS	1.05
FAR	0.14
POD	0.90
TS	0.79
E	16.5
GSS	0.06

Представленные в таблице 3.8 индексы позволяют сделать следующие выводы:

- мезомасштабная модель WRF-ARW завышает количество наблюдаемых осадков в апреле 2018 на станции Бужумбура поскольку коэффициент BIAS больше 1.

- ложная тревога при прогнозе с помощью модели WRF-ARW имеет доля 0,1363.

- доля правильного моделирования на станции Бужумбура составляет 0,904

-доля всех прогнозируемых или наблюдаемых событий, которые были правильными 0,79.

-прогноз количества осадков имеет точность до 0,061.

Исходя из результатов климатических изменений количества осадков на станции Бужумбура можно ввести следующую классификацию:

-А:0- 1 мм/сутки – градация слабых осадков (ГСО) было/не было.

-В: 1-5 мм/сутки – градация умеренных осадков (ГУО).

-С:5-20 мм/сутки – градации сильных осадков (ГСИО).

-D: больше 20 мм /сутки – градация очень сильных осадков (ГОСО).

Таблица 3.9 — Число случаев появления градации по прогнозированным и фактическим значениям количества осадков

Градация количества осадков	Число случаев появления градации по прогнозированным значениям количества осадков	Число случаев появления градации по фактическим значениям количества осадков
А	10	12
В	13	8
С	2	4
D	3	4

В таблице 3.9 хорошо отражается информация о том, что осадки являются одной из самых сложных для прогнозирования метеорологической величиной, которые плохо прогнозируются. Несмотря на то что прогнозируются и наблюдаются осадки по факту, при прогнозе количества осадков наблюдается проблема, связанная с точностью попадания в градацию и точности количества осадков и соответственно, не хорошо получится применять меры защиты неблагоприятных явлений, вызванных

количеством осадков. При прогнозе количества осадков мезомасштабной модели WRF-ARW, наблюдалось, что число случаев появлений сильных и очень сильных осадков было 5, но по факту, число случаев появлений сильных и очень сильных осадков было 8 поэтому, в данном случае понятно, что прогноз не может хорошо помочь при применении мера защита.

3.2. Оценка качества гидродинамического прогноза для станции Гитега

3.2.1 Оценка гидродинамического прогноза температуры на станции Гитега

Гистограмма рисунка 3.16 показывает частоту появления какого-то значения минимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега. По фактическим данным, минимальная температура, которая наблюдается с большой вероятностью, находится в диапазоне от 15⁰С до 16⁰С и появляется 15 раз. По прогностическим данным, минимальная температура, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от 14⁰С до 15⁰С и от 15⁰С до 16⁰С и появляется по 14 раз. По фактическим данным видно, что с меньшей вероятностью наблюдется минимальная температура в диапазон от 13⁰С до 14⁰С и от 17⁰С до 18⁰С по 3 раза. По прогностическим данным видно, что с меньшей вероятностью наблюдется три раза минимальная температура в диапазон от 13⁰С до 14⁰С.

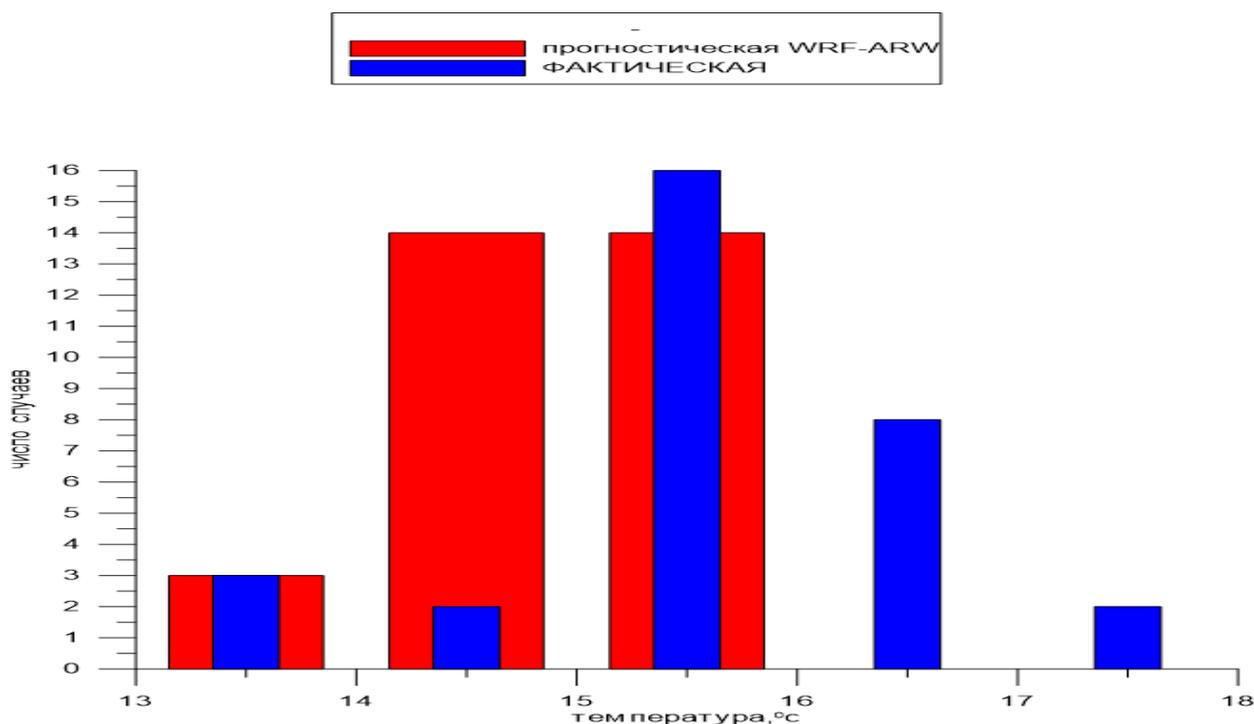


Рисунок 3.16 - Изменение минимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега

По гистограмме, приведённой на рисунке 3.17, представлена частота появления значения ошибок прогнозирования минимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. На этой гистограмме, значения ошибок прогнозирования, приводящие к неоправдываемости прогноза, наблюдаются в диапазоне от -4°C до -2°C и появляются всего 5 раз. В основном, ошибка прогнозирования минимальной температуры, которая наблюдается с большой вероятностью, находится в диапазоне от -1°C до 0°C и появляется 14 раз и данная ошибка не приводит к неоправдываемости прогноза.

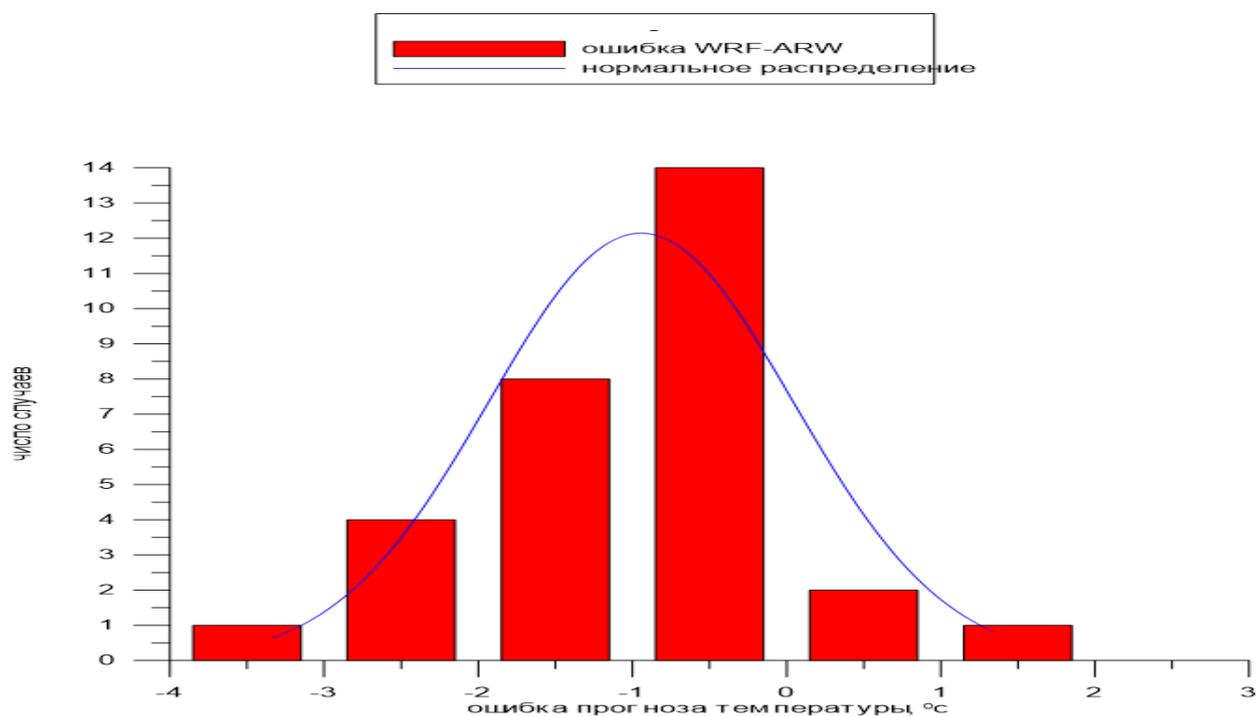
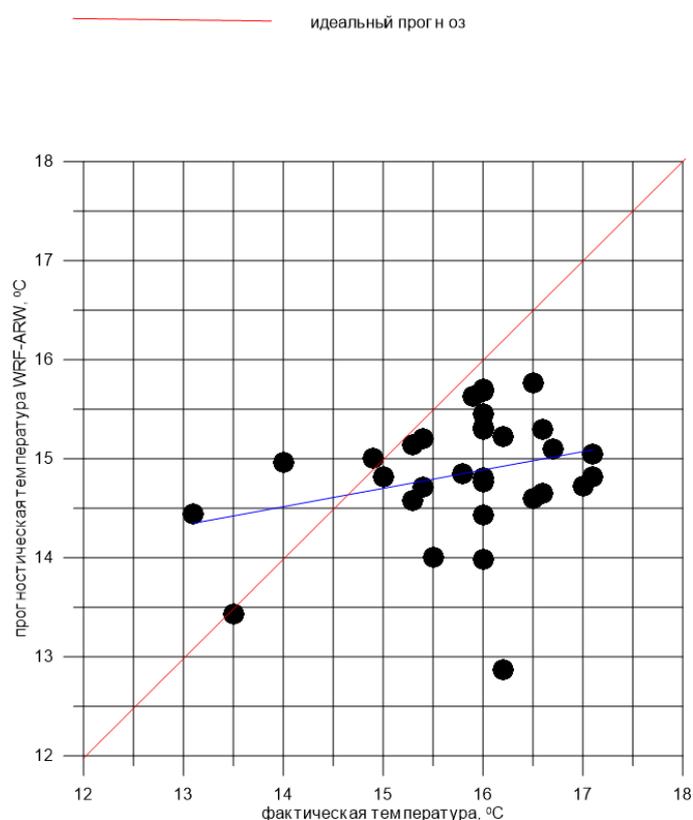


Рисунок 3.17 – Изменение ошибок минимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега

Расчетные значения межгрупповой дисперсии, Дисперсии фактической и прогностической минимальной температуры соответственно имеют значения 0.223190105, 0.891955556 и 0.410523057. Межгрупповая дисперсия характеризует систематическую вариацию минимальной температуры между фактическим и рядом прогностических температуры. В связи с тем, что дисперсия прогностических данных меньше дисперсии фактических данных, можно сделать вывод о том, что прогноз минимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега был успешно.



идеального прогноза.

Таблица 3.10 – среднее значение минимальных температур и дисперсия в апреле 2018 на станции Гитега

фактическая средняя температура	15.8 ⁰ с
прогностическая средняя температура	14.9 ⁰ с
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	15.3 ⁰ с
Межгрупповая дисперсия	0.22
Дисперсия фактической минимальной температуры	0.89
Дисперсия прогностической минимальной температуры	0.41

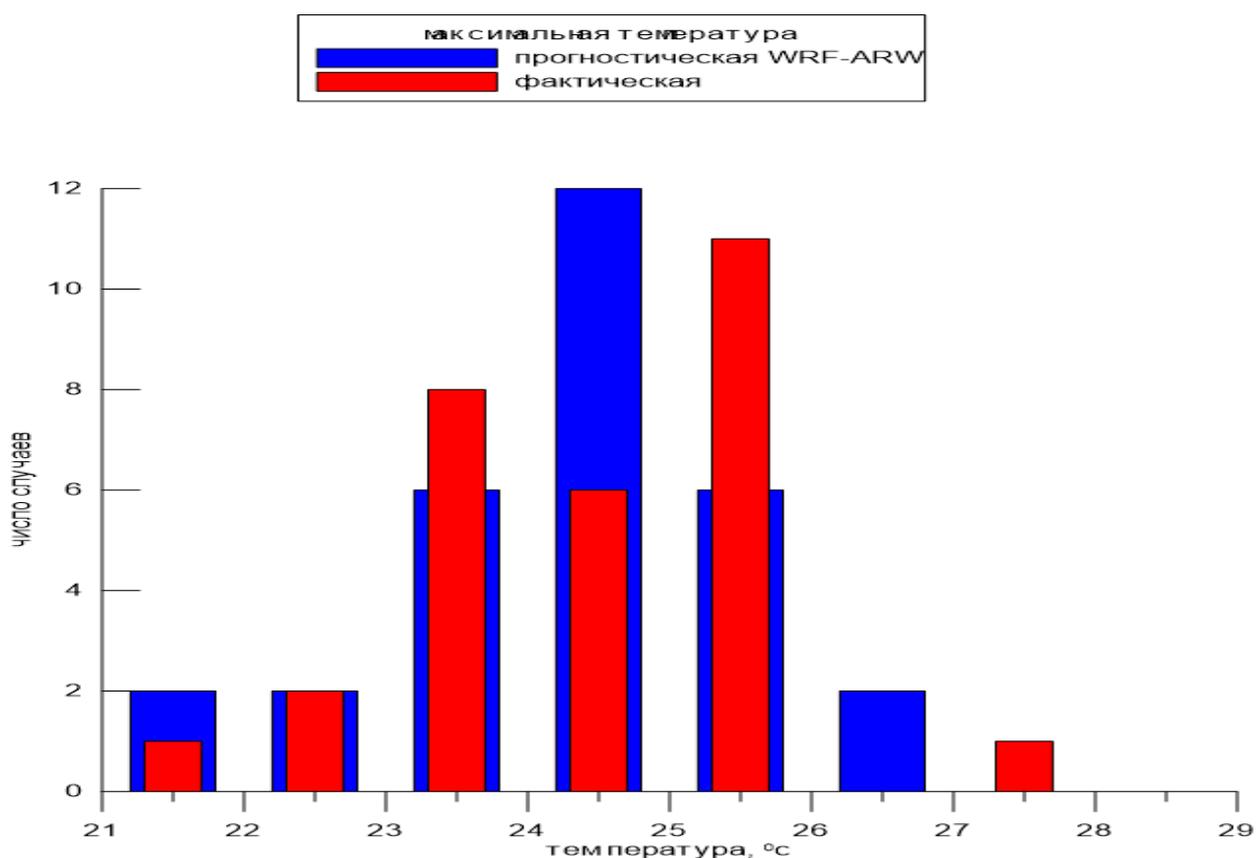


Рисунок 3.19 - Изменение максимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега

На гистограмме, представленной на рисунке 3.19, показана частота появления значения максимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега. По фактическим данным, с большой вероятностью максимальная температура находится в диапазоне от 24⁰С до 25⁰С и появляется 12 раз. По прогностическим данным, с большой вероятностью максимальная температура находится в диапазоне от 25⁰С до 26⁰С и появляется 11 раз. При прогнозировании с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW, с меньшей вероятностью максимальная температура наблюдается в диапазонах от 21⁰С до 22⁰С, от 22⁰С до 23⁰С и от 26⁰С до 27⁰С. На этой же гистограмме видно, что с меньшей вероятностью наблюдается по факту минимальная температура в диапазонах от 21⁰С до 22⁰С и от 27⁰С до 28⁰С.

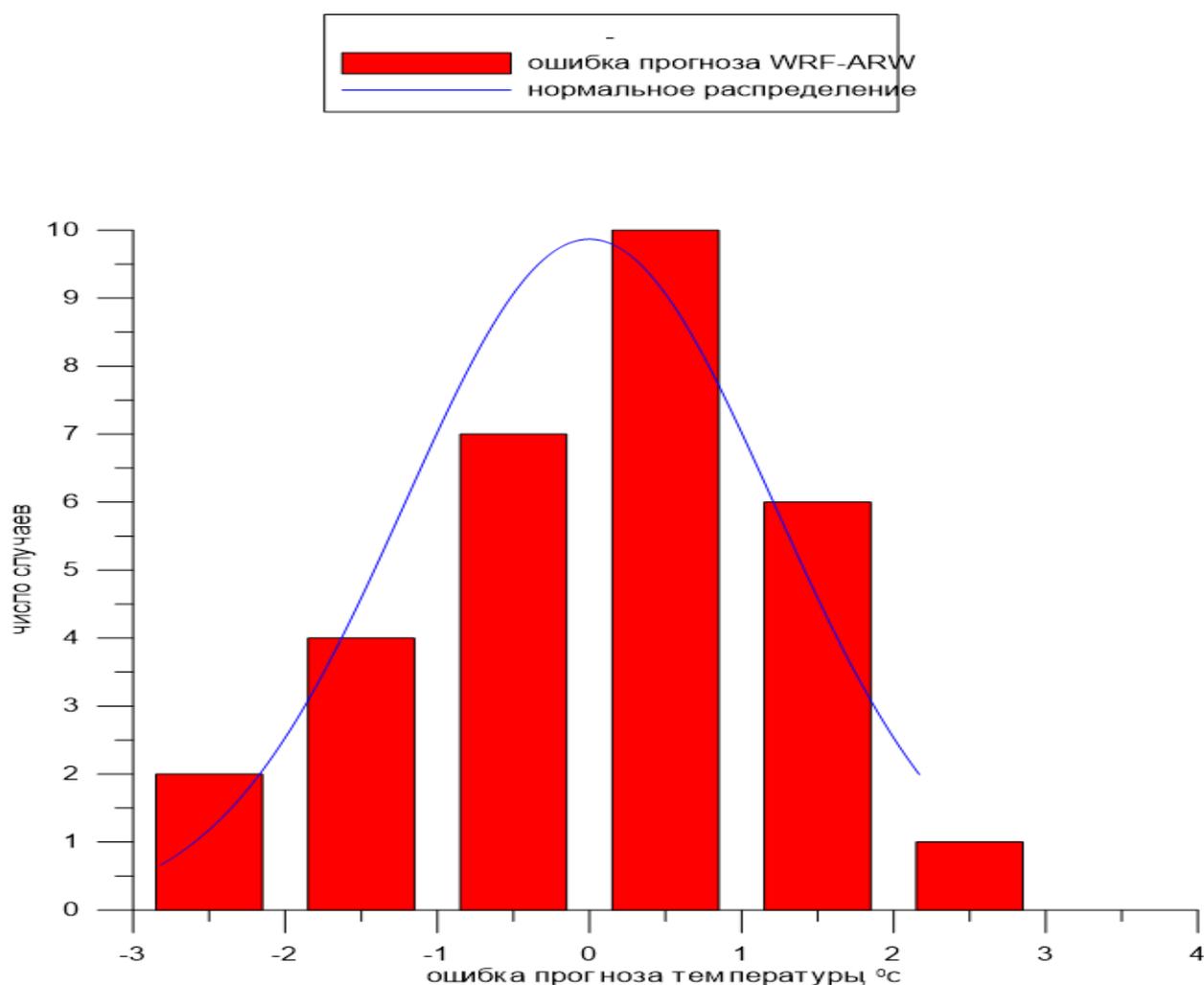


Рисунок 3.20 – Изменение ошибок максимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега

Гистограмма, представленная на рисунке 3.20, иллюстрирует частоту появления значения ошибки прогнозирования максимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. На этой гистограмме, значения ошибок прогнозирования, приводящие к неоправдываемости прогноза, наблюдаются в диапазоне от -3°C до -2°C , от -2°C до 3°C и появляются всего 3 раза. С большой вероятностью, ошибка прогнозирования максимальной температуры находится в диапазонах от 0°C до 1°C и появляется 10 раз и данная ошибка не приводит к неоправдываемости прогноза.

Дисперсия фактической максимальной температуры и дисперсия прогностической максимальной температуры соответственно равняются 1.40 и 1.3. по полученным значениям дисперсий, можно прийти к выводу о том, что прогноз максимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега был успешно. Также рассчитана межгрупповая дисперсия по значениям фактической и прогностической температуры. Межгрупповая дисперсия намного меньше единице ($8.02 \cdot 10^{-08}$) и в связи с этим, систематическая вариация максимальной температуры между фактическим и рядом прогностических температуры незначительна.

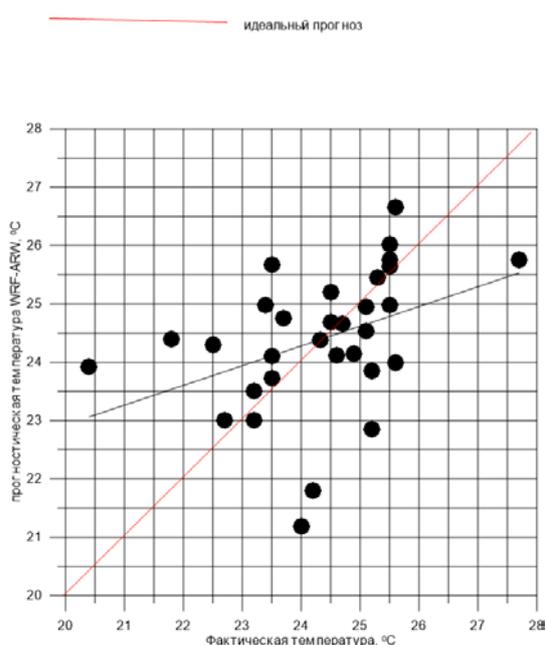


Рисунок 3.21 – Диаграмма рассеивания максимальной температуры в апреле 2018 на станции Гитега

На рисунке 3.21 представлена диаграмма рассеивания, на которой показано, как произошел бы идеальный прогноз, если не было бы ошибки в прогнозе с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. На диаграмме, синяя линия показывает изменение температуры по прогнозу модели WRF-ARW, а красная показывает, как пошел бы прогноз если не было бы ошибки.

Таблица 3.11—среднее значение максимальных температур и дисперсия в апреле 2018 на станции Гитега

фактическая средняя температура	24.4 °C
прогностическая средняя температура	24.4 °C
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	24.4 °C
Межгрупповая дисперсия	$8.02 \cdot 10^{-08}$
Дисперсия фактической максимальной температуры	1.40
Дисперсия прогностической максимальной температуры	1.30

На рисунке 3.22, фактические данные показывают, что минимальная температура, которая наблюдается с большой вероятностью в июле 2018 на станции Гитега находится в диапазоне от 11 °C до 12 °C и появляется 14 раз, но результаты прогноза с помощью модели WRF-ARW показывают, что минимальная температура, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от 13 °C до 14 °C и появляется 12 раза. Также Фактические данные показывают, что с меньшей вероятностью наблюдется минимальная температура в диапазонах от 9 °C до 10 °C и от 13 °C до 15 °C. Модель прогнозирует минимальную температуру с меньшей вероятностью появления в диапазоне от 15 °C до 16 °C.

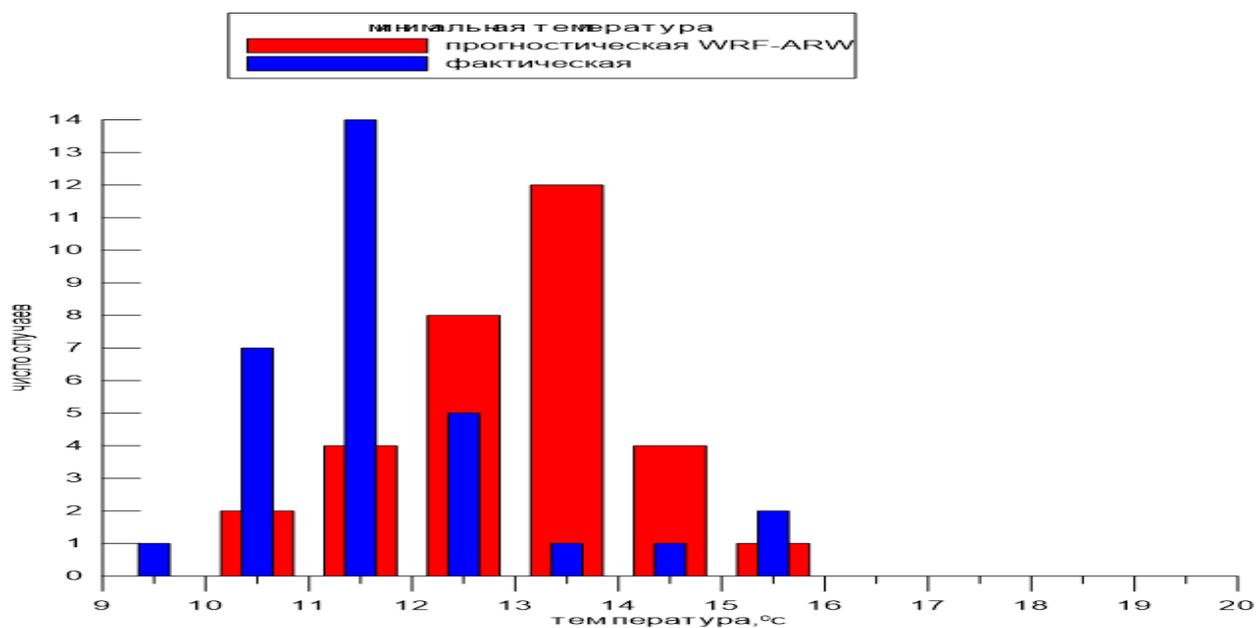


Рисунок 3.22 - Изменение минимальной температуры в июле 2018 на станции Гитега.

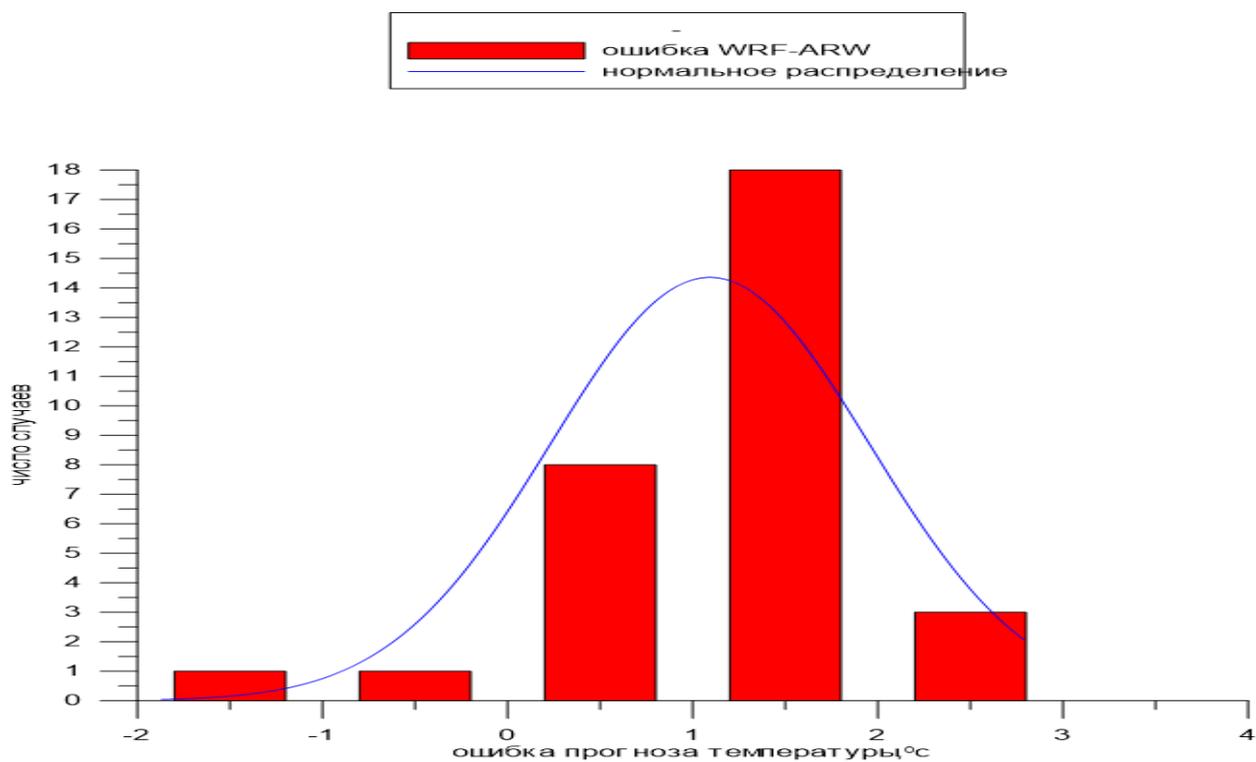


Рисунок 3.23– Изменение ошибок минимальной температуры в июле 2018 на станции Гитега.

На рисунке 3.23 представлено изменение ошибок минимальной

температуры в июле 2018 на станции Гитега при прогнозе с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. Ошибка прогнозирования минимальной температуры, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от 1⁰С до 2⁰С и появляется 18 раз. значения ошибок прогнозирования, приводящие к неоправдываемости прогноза, наблюдаются в диапазоне от 2⁰С до 3⁰С и появляются всего 3 раза.

Межгрупповая дисперсия равняется 0.2983. Систематическую вариацию минимальной температуры между фактическим и рядом прогностических температуры выражает межгрупповая дисперсия. Расчетные значения дисперсий фактической и прогностической минимальной температуры соответственно имеют значения 1.786701353 и 1.104987088. Исходя из значений дисперсий фактической и прогностической минимальной температуры в июле на станции Гитега в 2018, можно сделать вывод о том, что прогноз минимальной температуры был успешно поскольку дисперсия прогностических данных меньше дисперсии фактических данных.

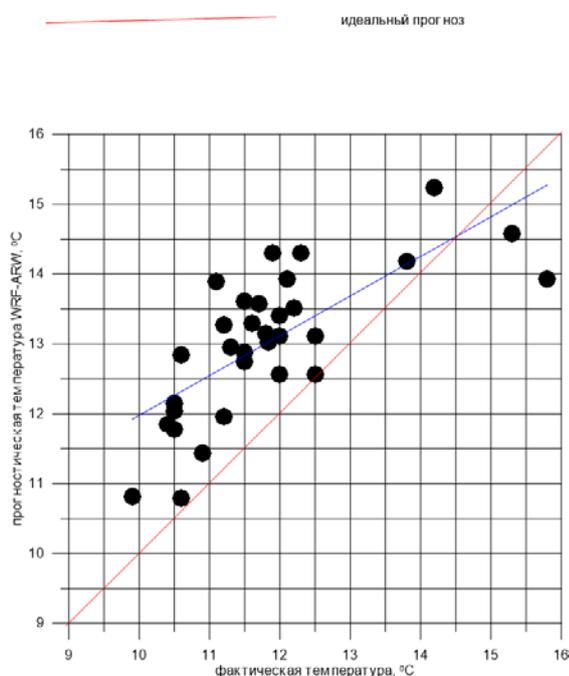


Рисунок 3.24– Диаграмма рассеивания минимальной температуры в июле 2018 на станции Гитега

На рисунке 3.24 представлена диаграмма, на которой показано, как произошел бы идеальный прогноз минимальной температуры в июле 2018 на станции Гитега, если не было бы ошибки в прогнозе с мезомасштабной модели WRF-ARW. На диаграмме синяя линия показывает изменение температуры по прогнозу модели WRF-ARW. Идеальный прогноз указывается красной линией. Направление идеального прогноза не совпадает с направлением реального прогноза из-за ошибок, которые наблюдаются в результате прогнозирования WRF-ARW.

Таблица 3.12 – среднее значение минимальных температур и дисперсия в июле 2018 на станции Гитега

фактическая средняя температура	11.93 °С
прогностическая средняя температура	13.02 °С
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	12.5 °С
Межгрупповая дисперсия	0.298
Дисперсия фактической минимальной температуры	1.786
Дисперсия прогностической минимальной температуры	1.105

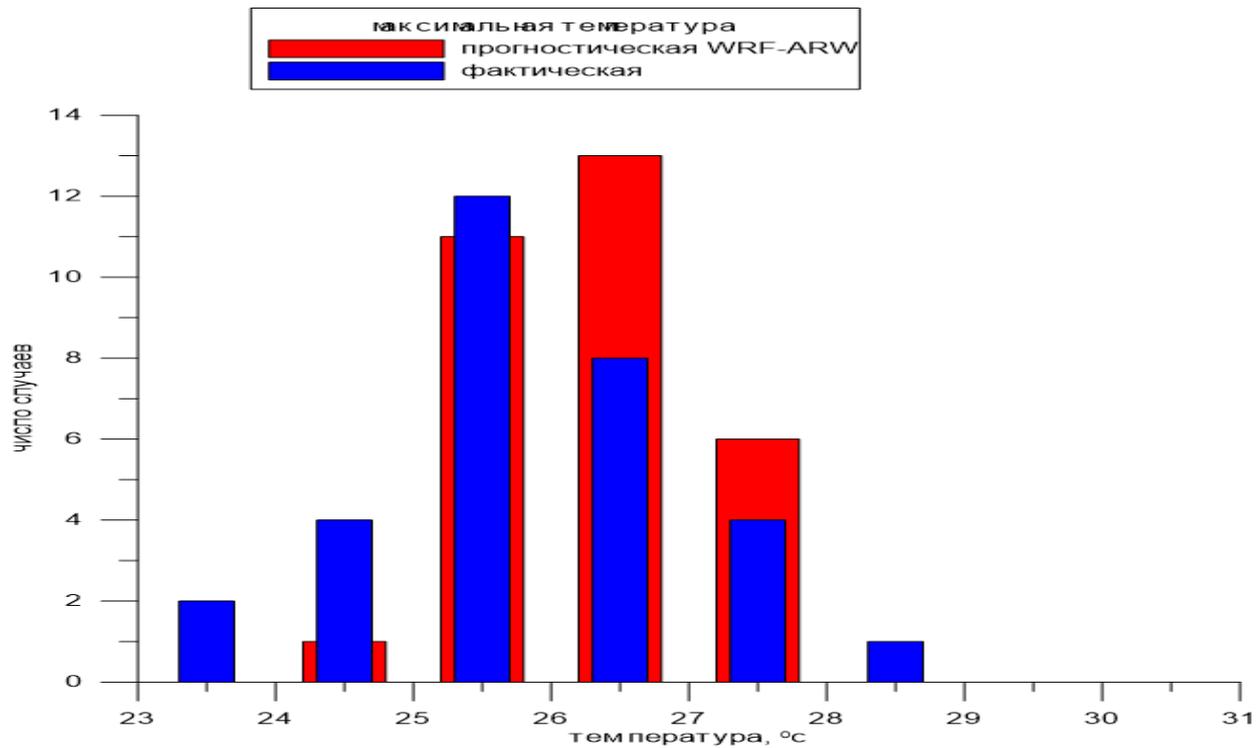


Рисунок 3.25 - Изменение максимальной температуры в июле 2018 на станции Гитега

На рисунок 3.25 представлена гистограмма, на которой показано число случаев появления значений максимальной температуры в июле 2018 на станции Гитега. По фактическим данным, максимальная температура, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от 25⁰С до 26⁰С и появляется 12 раз. По прогностическим данным, максимальная температура, которая наблюдается с большой вероятностью находится в диапазоне от 26⁰С до 27⁰С числом случаев 13. На этой же гистограмме видно, что с меньшей вероятностью наблюдется по факту максимальная температура в диапазон от 28⁰С до 29⁰С и по прогнозу редко наблюдается максимальная температура в диапазоне от 24⁰С до 25⁰С.

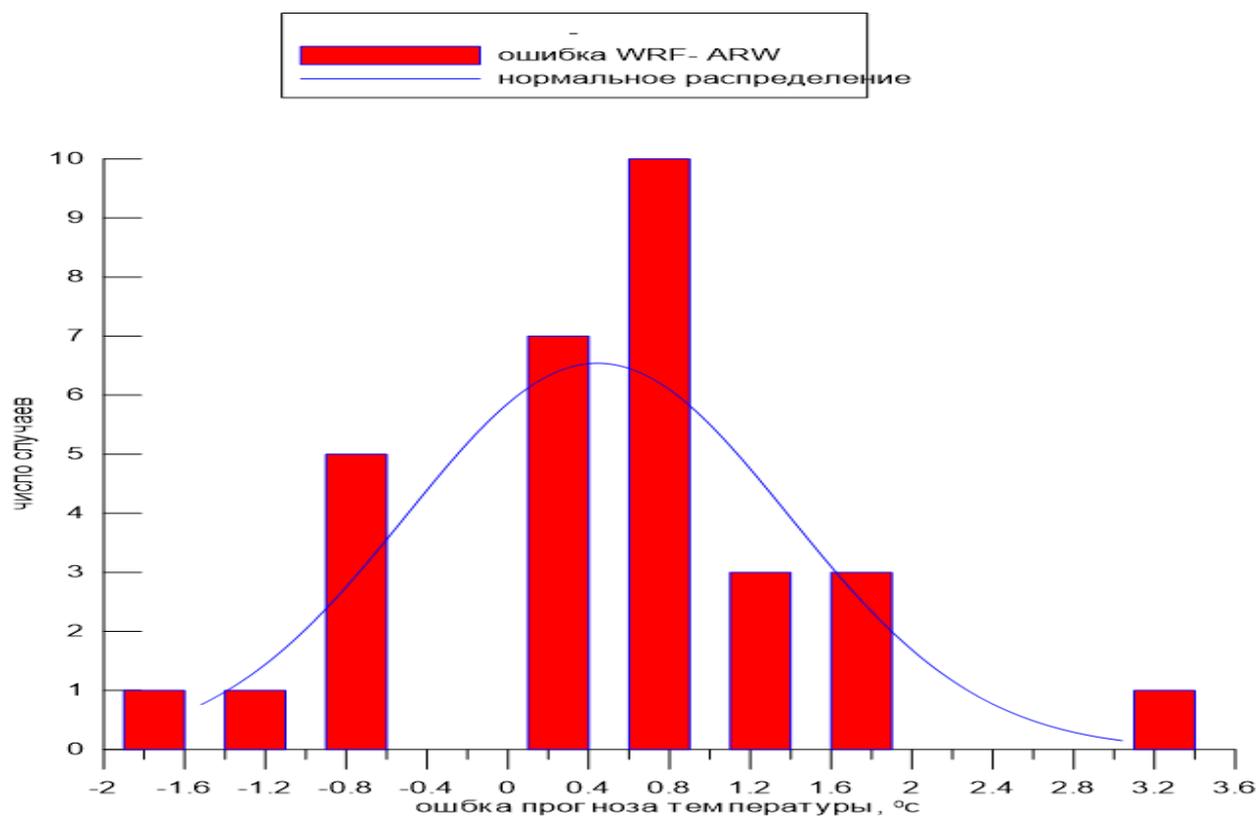


Рисунок 3.26 – Изменение ошибок максимальной температуры в июле 2018 на станции Гитега

На рисунке 3.26 представлена гистограмма, на которой показано число случаев появления диапазона значения ошибки прогнозирования максимальной температуры в июле 2018 на станции Гитега с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. На этой гистограмме ошибка прогнозирования минимальной температуры, которая приводит к неоправданности наблюдения только один раз в протяжении всего месяца и находится в диапазоне от 3⁰С до 4⁰С.

Дисперсионный анализ показывает, что прогноз максимальной температуры на станции Гитега был успешно потому что дисперсия прогностических значений максимальной температуры меньше дисперсия фактических значений максимальной температуры. Значения дисперсия прогностических, фактических значений максимальной температуры и межгрупповая дисперсия указаны в таблице 3.13

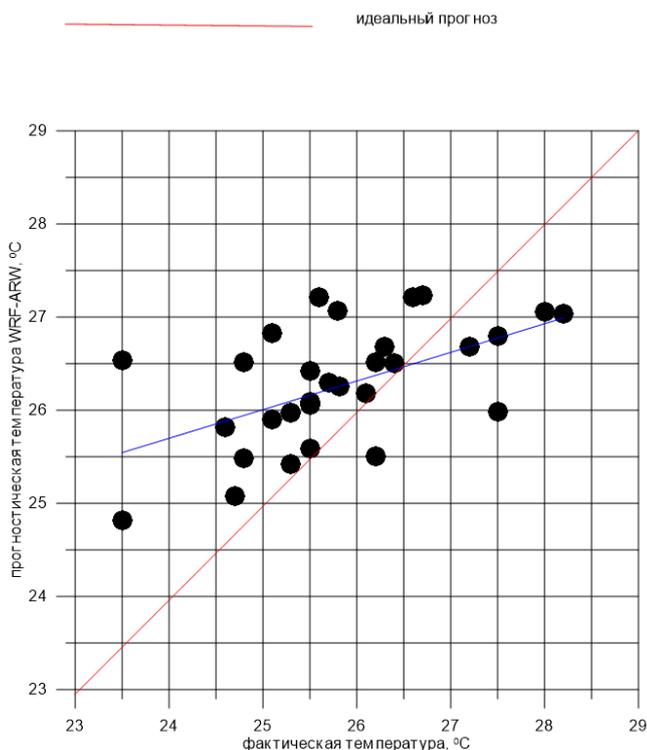


Рисунок 3.27 – Диаграмма рассеивания максимальной температуры в июле 2018 на станции Гитега

На рисунке 3.27 представлена диаграмма рассеивания, на которой показано как произошел бы идеальный прогноз если не было бы ошибки в прогнозе с мезомасштабной модели WRF-ARW. Направление идеального прогноза не совпадает с направлением реального прогноза из-за ошибок, которые наблюдаются в результате прогнозирований. Красная линия показывает, как был бы идеальный прогноз при отсутствии ошибок прогноза.

Таблица 3.13 – Среднее значение максимальных температур и дисперсия в июле 2018 на станции Гитега

фактическая средняя температура	25.8 ⁰ с
прогностическая средняя температура	26.3 ⁰ с
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	26.0 ⁰ с
Межгрупповая дисперсия	0.0492

Дисперсия фактической максимальной температуры	1.237
Дисперсия прогностической максимальной температуры	0.417

1.2.2. Оценка гидродинамического прогноза количества осадков на станции Гитега

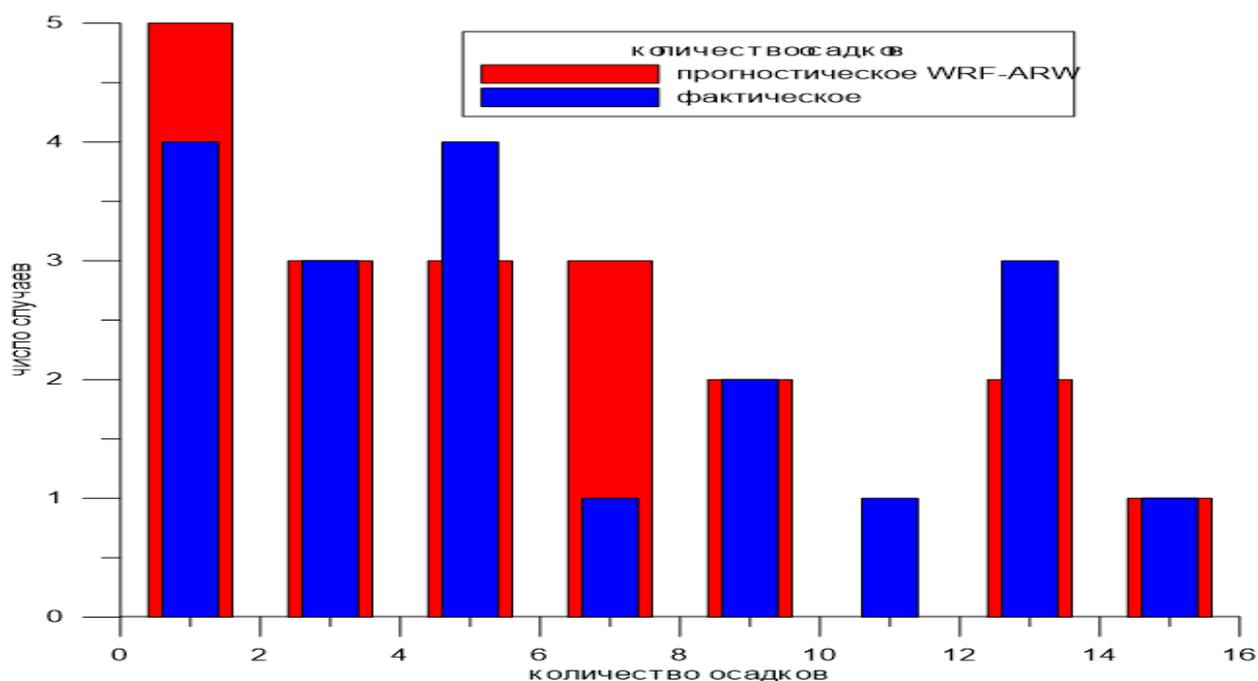


Рисунок 3.28 - Изменение количества осадков в апреле 2018 на станции Гитега

Согласно гистограмме, приведённой на рисунке 3.28 показывает, что фактическое количество осадков наблюдалось с большой вероятностью на станции Гитега в апреле 2018 в диапазонах от 0мм до 2мм в сутки и от 4мм до 6мм в сутки. прогностическое количество осадков в свои очереди наблюдается с большой вероятностью на станции Гитега в апреле 2018 в диапазонах от 0мм до 2мм в сутки и от 4мм до 6мм в сутки. Вероятностное количество осадков в диапазоне от 0 до 5 мм в сутки. По прогнозу и по фату, мало вероятностное количество осадков наблюдается в диапазоне от 14 до 16 мм за сутки.

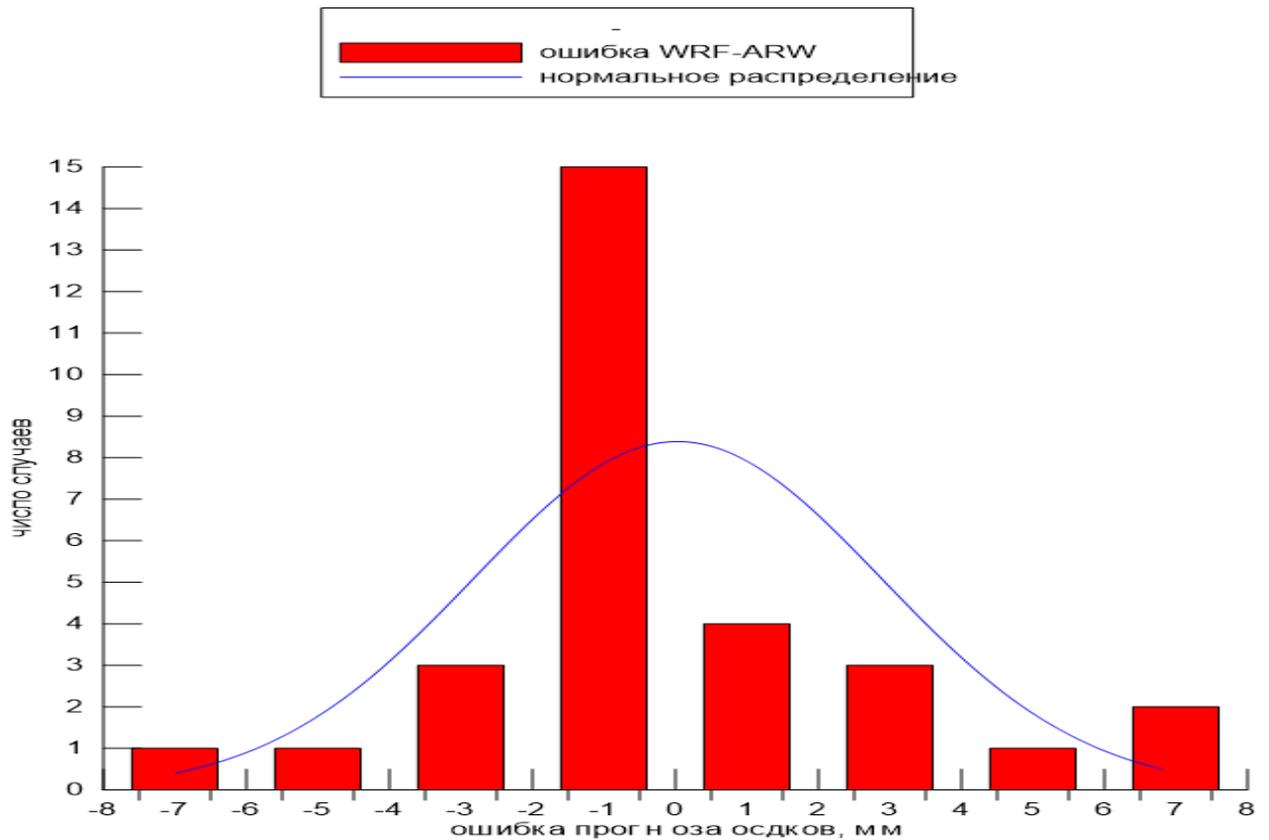


Рисунок 3.29 - Изменение ошибок прогноза количества осадков в апреле 2018 на станции Гитега

Гистограмма, показанная на рисунке 3.29, показывает, что вероятностная ошибка прогноза количества осадков находится в диапазоне от -2мм до 0 мм в сутки. Мало вероятностная ошибка прогноза количества осадков наблюдается в диапазоне от -8мм до -6 мм за сутки.

Поскольку дисперсия прогностического количества осадков меньше дисперсии фактического количества осадков можно сделать вывод о том, что прогноз количества осадков в апреле на станции Гитега оправдался. Значения дисперсий представлены в таблице 3.14.

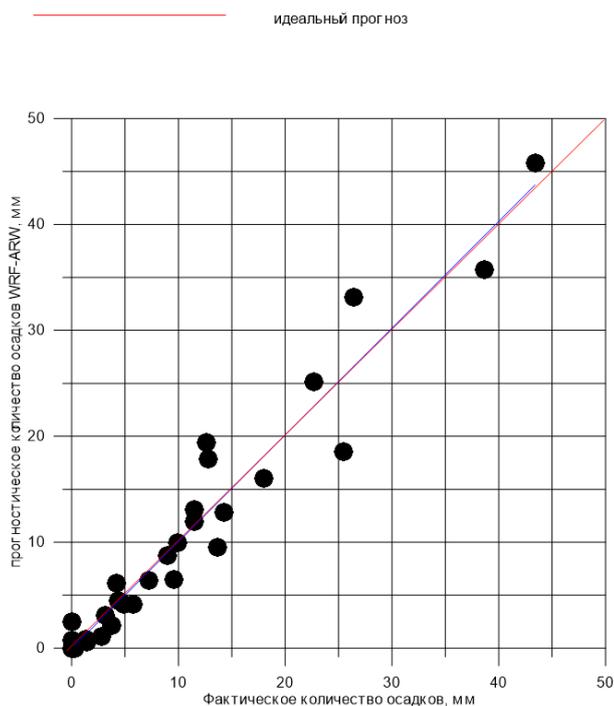


Рисунок 3.30 – Диаграмма рассеивания количества осадков в апреле 2018 на станции Гитега

Анализируя гистограмму рассеивания, приведённую на рисунке 3.30, видно, что прогноз количества осадков успешно произошёл поскольку линия идеального прогноза почти совпадает с линией реального прогноза с помощью модели WRF-ARW.

Таблица 3.14 – Среднее значение количества осадков и дисперсия в июле 2018 на станции Гитега

фактическое среднее количество осадков	9.9мм
прогностическая среднее количество осадков	9.97 мм
Дисперсия фактического количества осадков	11,7
Дисперсия прогностического количество осадков	11,6
Средняя ошибка	0,029мм

Таблица 3.15 –Статистические критерии оценки количества осадков в апреле 2018 на станции Гитега.

статистические характеристики	значение
<i>ME</i>	0.89
<i>MAE</i>	0.89
<i>RMSE</i>	15.6
<i>RE</i>	203.7
<i>CORR_{P,F}</i>	0.97

Из таблицы 3.15 видно, что коэффициент корреляции имеет высокое значение. Согласно классификации коэффициентов корреляции по шкале Чеддока, связь между фактическими и прогностическими количествами осадков очень высокая и соответственно понятно, что ряд фактического и прогностического количества осадков очень сильно связаны и меняются в одном направлении.

Таблица 3.16 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений в апреле 2018 на станции Гитега

		Наблюдение случая		
		A	ET	
Прогноз случая	A	4		26
	ET			4
		5		30

По матрице сопряженности (таблица 3.16), рассчитаны индексы, с помощью которых можно доказать качества прогнозирования количества осадков с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. Значения этих индексов представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17— индексы для оценки прогноза количества осадков в апреле 2018 на станции Гитега

Индексы	значения
BIAS	1.04
FAR	0.08
POD	0.96
TS	0.89
E	21.67
GSS	0.05

По полученным индексам, представленным в таблице 3.17, можно сделать следующие выводы:

-мезомасштабная модель WRF-ARW завышает количество наблюдаемых осадков в апреле 2018 на станции Гитега поскольку коэффициент BIAS больше 1.

-ложная тревога при прогнозе с помощью модели WRF-ARW имеет доля 0.08.

- доля правильного моделирования на станции Гитега составляет 0,96

-доля всех прогнозируемых или наблюдаемых событий, которые были правильными 0,89.

-прогноз количества осадков имеет точность до 0,05.

Исходя из результатов анализа количества осадков на станции Гитега можно ввести следующую классификации:

-А:0- 1 мм/сутки – градация слабых осадков (ГСО) было/не было.

-В: 1-5 мм/сутки – градация умеренных осадков (ГУО).

-С:5-20 мм/сутки – градации сильных осадков (ГСИО).

-D: больше 20 мм /сутки – градация очень сильных осадков (ГОСО).

В таблице 3.18 приведена информация о количестве случаев осадков для каждой градации.

Таблица 3.18— Число случаев появления градации по прогнозированным и фактическим значениям количества осадков на станции Гитега

Градация количества осадков	Число случаев появления градации по прогнозированным значениям количества осадков	Число случаев появления градации по фактическим значениям количества осадков
A	8	7
B	7	8
C	11	10
D	4	5

По таблице 3.18 видно, что при прогнозе количества осадков наблюдается иногда несовпадение в градации интенсивности осадков. В связи с этим, наблюдается сложности применения мер защиты чтобы предотвратить плохие последствия, которые могут быть вызваны осадками.

3.3 Оценка качества гидродинамического прогноза для станций Мусаса

3.3.1. оценка гидродинамического прогноза температуры на станции Мусаса

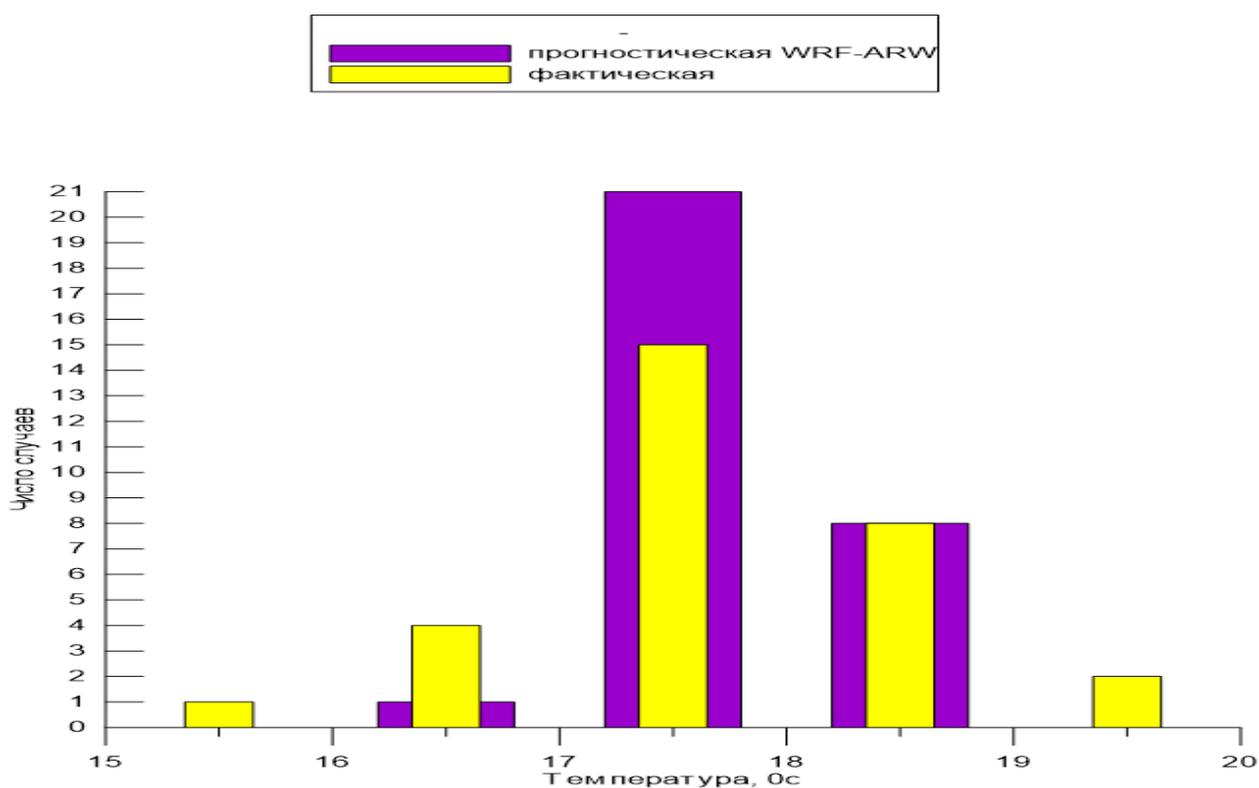


Рисунок 3.31 - Изменение минимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса

По данным, представленным на рисунке 3.31, можно увидеть частоту появления диапазона значения минимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса. Фактические данные показывают, что минимальная температура, наблюдающаяся с большой вероятностью, находится в диапазоне от 17⁰С до 18⁰С и появляется 15 раз. Прогноз показывает, что минимальная температура, наблюдающаяся с большой вероятностью, находится также в диапазоне от 17⁰С до 18⁰С и появляется 14 раза. По прогностическим данным видно, что с меньшей вероятностью наблюдется

три раза минимальная температура в диапазон от 16⁰С до 17 ⁰С. По фактическим данным видно, что с меньшей вероятностью наблюдается минимальная температура в диапазоне от 15⁰С до 16 ⁰С.

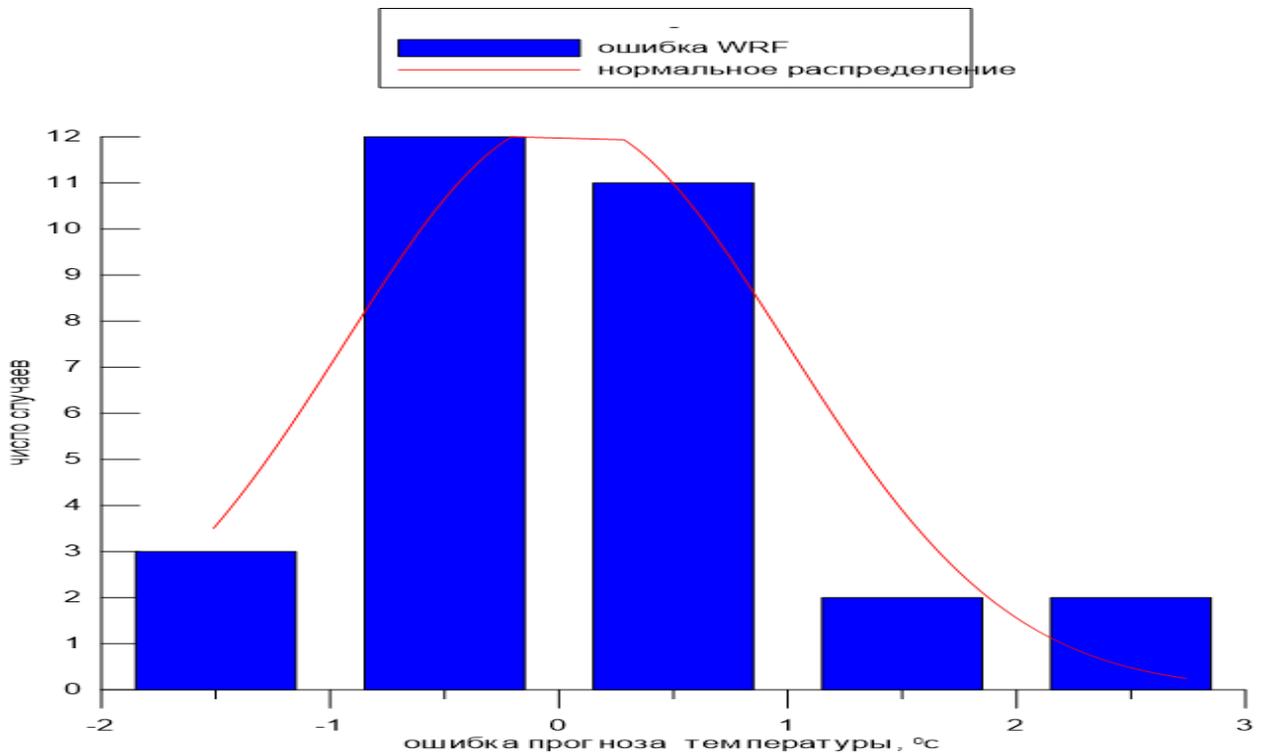


Рисунок 3.32– Изменение ошибок минимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса

На рисунке 3.32, отображена частота появления значения ошибок прогнозирования минимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. Рисунок 3.32 иллюстрирует, что значения ошибок прогнозирования, приводящие к неоправдываемости прогноза, наблюдаются в диапазоне от 2⁰С до 3 ⁰С и появляются всего лишь 2 раза. Ошибка прогнозирования минимальной температуры, наблюдающаяся с большой вероятностью, находится в диапазоне от -1⁰С до 0⁰С и появляется 12 раз и данная ошибка не приводит к неоправдываемости прогноза.

Дисперсионный анализ минимальных значений температур (таб. 3.19) по прогноз и по факту для станции Мусаса в апреле 2018 позволяет сделать

вывод об успешности прогноза с помощью модели WRF-ARW поскольку дисперсия фактических значений больше дисперсии прогностических значений.

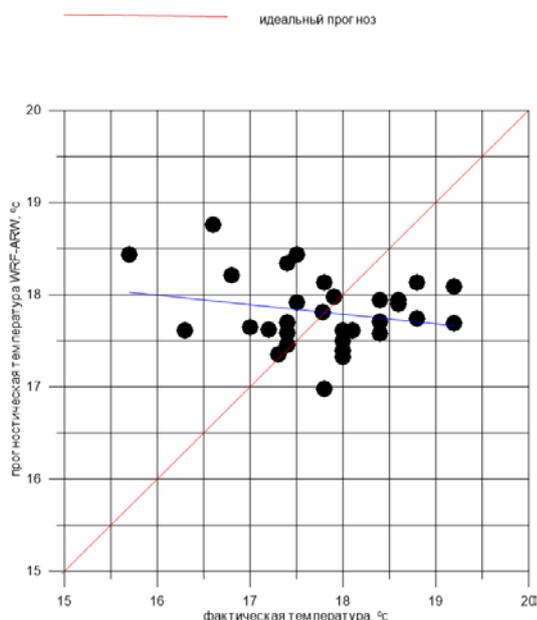


Рисунок 3.33 – Диаграмма рассеивания минимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса

Диаграмма рассеивания минимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса иллюстрирует, как произошел бы идеальный прогноз если не было бы ошибки в прогнозе с мезомасштабной модели WRF-ARW. На диаграмме, Синяя линия показывает изменение температуры по прогнозу модели WRF-ARW. Красная линия показывает направление идеального прогноза.

Таблица 3.19 – среднее значение минимальных температур и дисперсия в апреле 2018 на станции Мусаса

фактическая средняя температура	17.8 ⁰ С
прогностическая средняя температура	17.8 ⁰ С
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	17.8 ⁰ С

Межгрупповая дисперсия	0.000199
Дисперсия фактической минимальной температуры	0.65672
Дисперсия прогностической минимальной температуры	0.1448

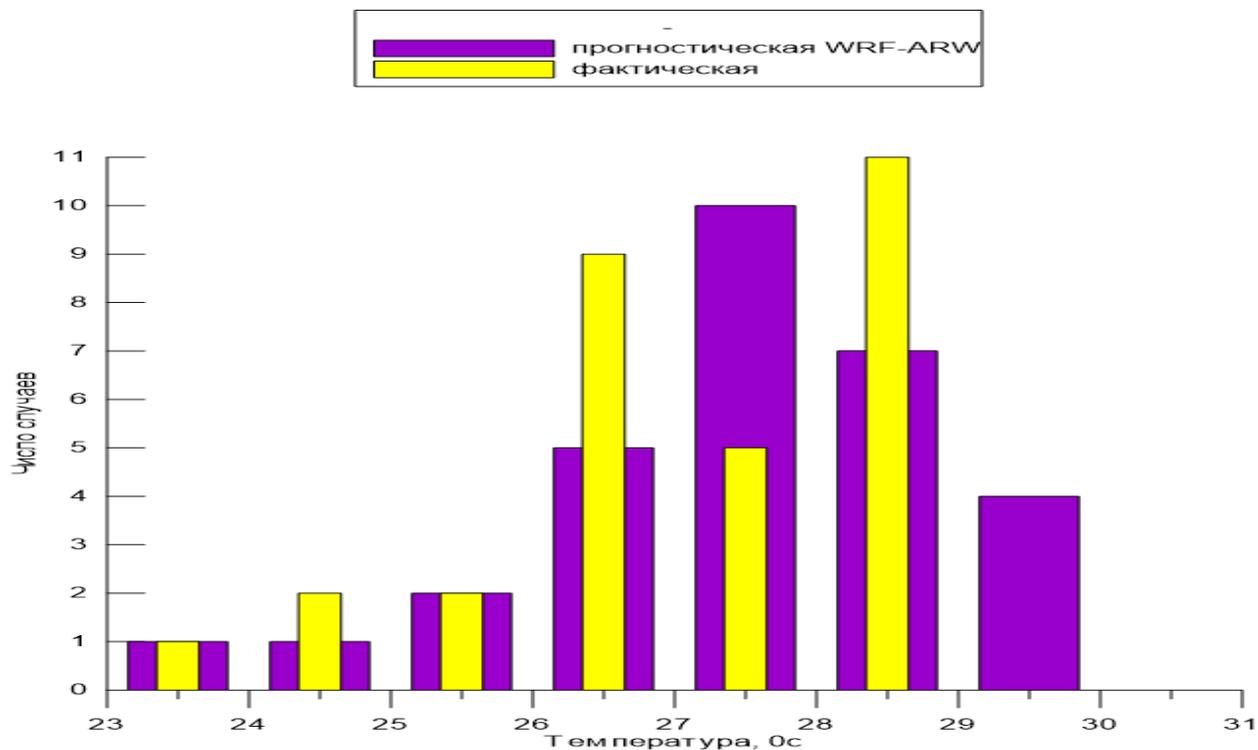


Рисунок 3.34- Изменение максимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса

На гистограмме, представленной на рисунке 3.34 показана частота появления значения максимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса. По фактическим данным, с большой вероятностью максимальная температура находится в диапазоне от 28⁰С до 29⁰С и появляется 11 раз. По прогностическим данным, с большой вероятностью максимальная температура находится в диапазоне от 27⁰С до 28⁰С и появляется 10 раз. Прогностические и фактические данные показывают, что с меньше вероятности максимальная температура наблюдается в диапазоне от 23⁰С до 25⁰С.

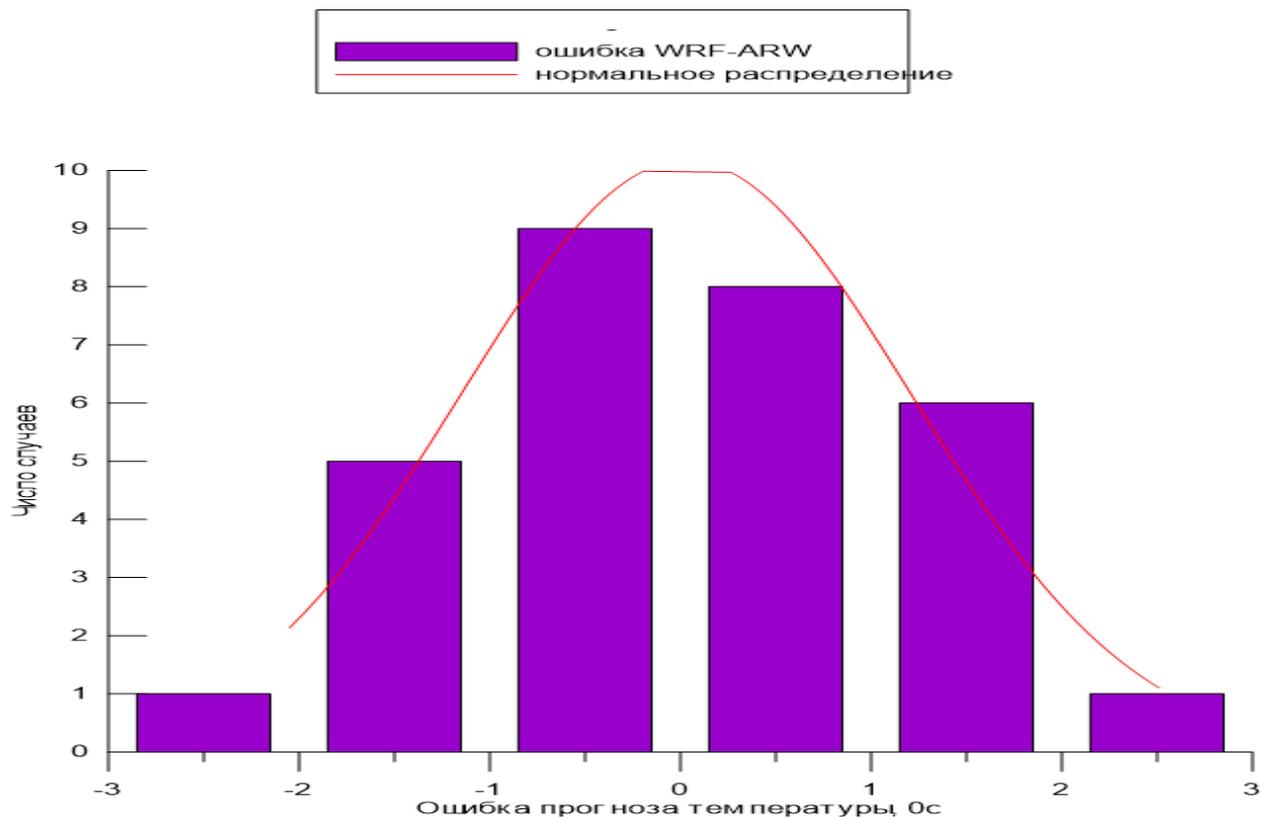


Рисунок 3.35 – Изменение ошибок максимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса

По гистограмму, представленной на рисунке 3.35, заметно, что значения ошибок прогнозирования, приводящие к неоправдываемости прогноза максимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса наблюдаются в диапазонах от -3°C до -2°C и от 2°C до 3°C и появляются всего лишь 2 раза. С большой вероятностью, ошибка прогнозирования максимальной температуры находится в диапазонах от -1°C до 1°C .

Значения дисперсии фактической максимальной температуры и дисперсии прогностической максимальной температуры позволяют прийти к выводу о том, что прогноз максимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса был успешно так как дисперсия фактической максимальной температуры приблизительно равно дисперсии прогностической максимальной температуры. Значения дисперсий находятся в таблице 3.20.

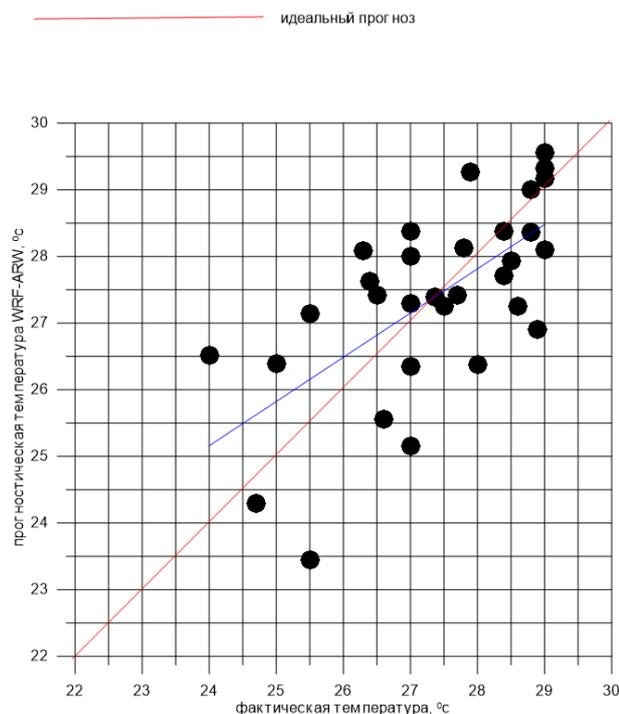


Рисунок 3.36 – Диаграмма рассеивания максимальной температуры в апреле 2018 на станции Мусаса

На рисунке 3.36 представлена диаграмма рассеивания, на которой показано как произошел бы идеальный прогноз если не было бы ошибки в прогнозе с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. На диаграмме, синяя линия показывает изменение температуры по прогнозу модели WRF-ARW, а красная показывает, как пошел бы прогноз если не был бы ошибки.

Таблица 3.20 – среднее значение максимальных температур и дисперсия в апреле 2018 на станции Мусаса

фактическая средняя температура	27.4 ⁰ C
прогностическая средняя температура	27.4 ⁰ C
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	27.4 ⁰ C
Межгрупповая дисперсия	0,0002
Дисперсия фактической максимальной температуры	2,000
Дисперсия прогностической максимальной температуры	2,0002

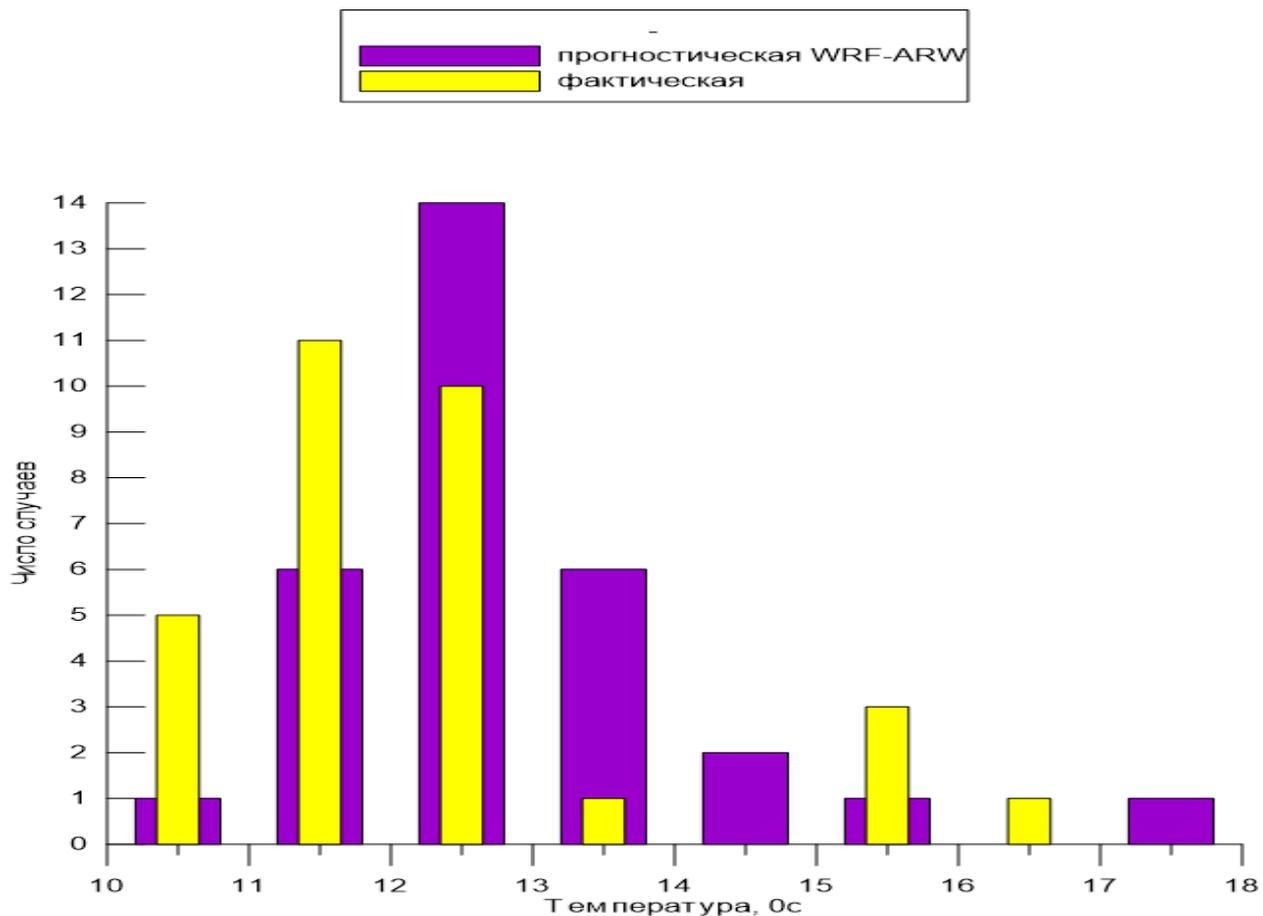


Рисунок 3.37 - Изменение минимальной температуры в июле 2018 на станции Мусаса

На рисунке 3.37, фактические данные показывают, что минимальная температура, наблюдающаяся с большой вероятностью в июле 2018 на станции Мусаса находится в диапазоне от 11⁰С до 12⁰С и появляется 11 раз, но результаты прогноза с помощью модели WRF-ARW показывают, что минимальная температура с большой вероятностью находится в диапазоне от 12⁰С до 13⁰С и появляется 14 раза. Согласно прогностическим данным, с меньшей вероятностью наблюдется минимальная температура в диапазонах от 10⁰С до 11⁰С, от 15⁰С до 16⁰С и от 17⁰С до 18⁰С. По фактическим данным, с меньшей вероятностью наблюдется минимальная температура в диапазонах от 13⁰С до 14⁰С и от 16⁰С до 17⁰С.

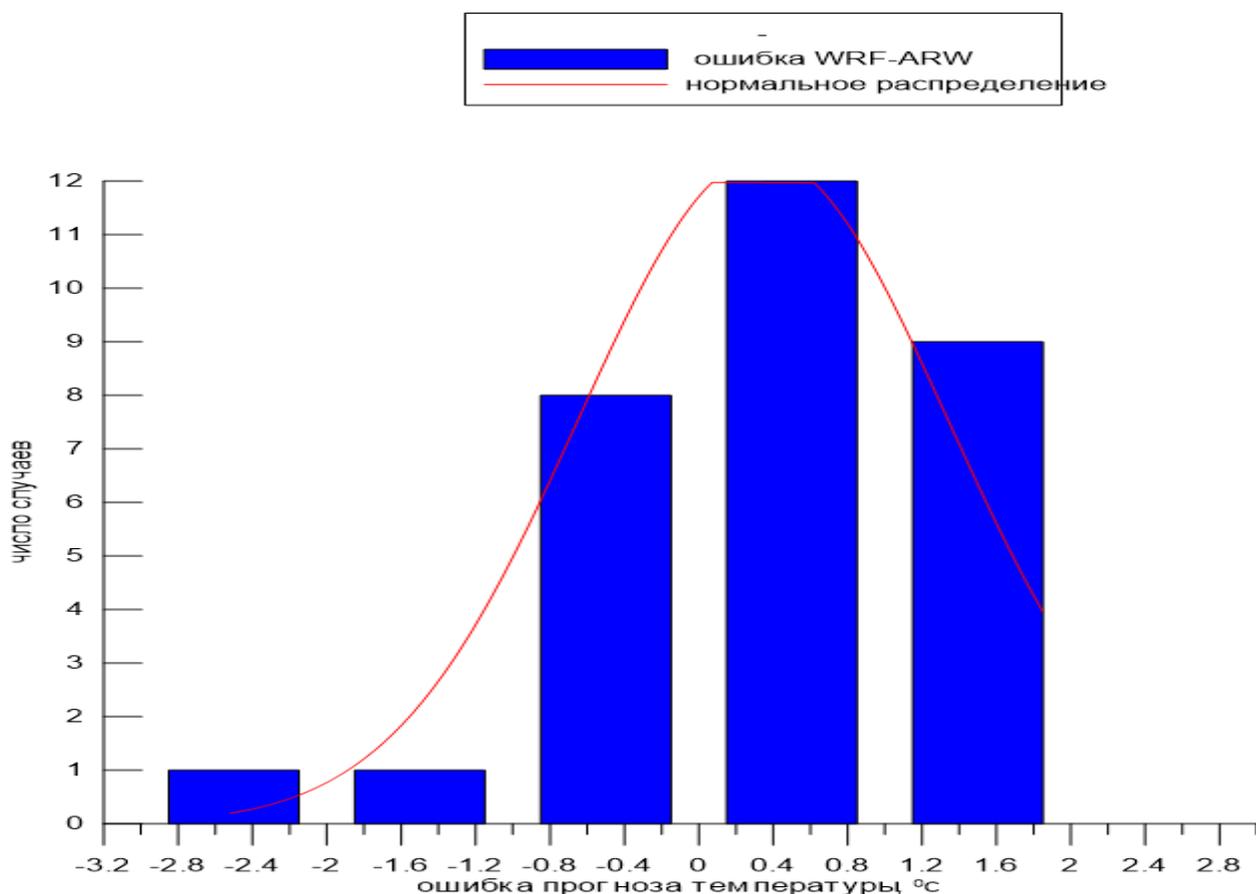


Рисунок 3.38 – Изменение ошибок минимальной температуры в июле 2018 на станции Мусаса

На рисунке 3.38 представлено изменение ошибок минимальной температуры в июле 2018 на станции Мусаса при прогнозе с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. Ошибка прогнозирования минимальной температуры, с большой вероятностью наблюдается в диапазоне от 0°C до 1°C и появляется 12 раз. Значения ошибок прогнозирования, приводящие к неоправданности прогноза, наблюдаются в диапазоне от -3°C до -2°C и появляются всего 2 раза.

Расчетные значения дисперсий фактической и прогностической минимальной температуры позволяют сделать вывод о том, что прогноз минимальной температуры на станции Мусаса в июле 2018 был успешно поскольку дисперсия прогностических данных меньше дисперсии фактических данных. Представлены значения дисперсий в таблице 3.21.

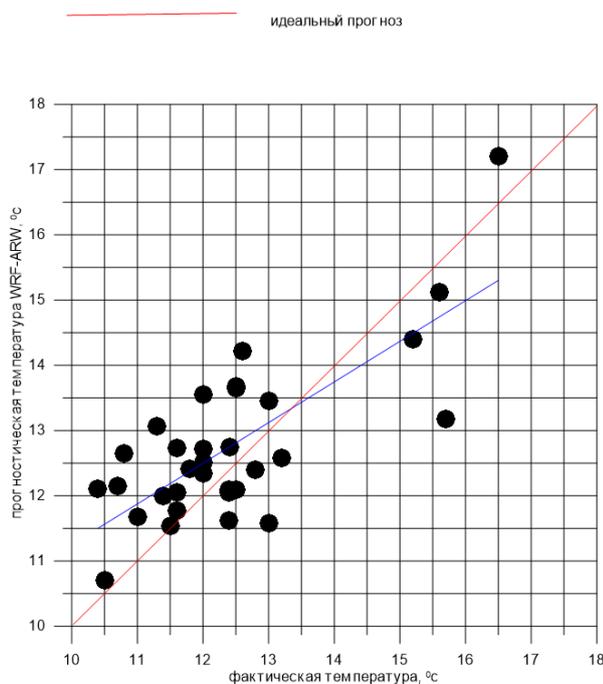


Рисунок 3.39 – Диаграмма рассеивания минимальной температуры в июле 2018 на станции Мусаса

На рисунке 3.39 представлена диаграмма, на которой показано, как произошел бы идеальный прогноз минимальной температуры в июле 2018 на станции Мусаса если не было бы ошибки в прогнозе с мезомасштабной модели WRF-ARW. На диаграмме синяя линия показывает изменение температуры по прогнозу модели WRF-ARW. Идеальный прогноз указывается красной линией. Направление идеального прогноза не совпадает с направлением реального прогноза из-за ошибок, которые наблюдаются в результате прогнозирования WRF-ARW.

Таблица 3.21 – среднее значение минимальных температур и дисперсия в июле 2018 на станции Мусаса

фактическая средняя температура	12.4 ⁰ С
прогностическая средняя температура	12.7 ⁰ С
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	12.6 ⁰ С
Межгрупповая дисперсия	0.029

Дисперсия фактической минимальной температуры	2.20
Дисперсия прогностической минимальной температуры	1.53

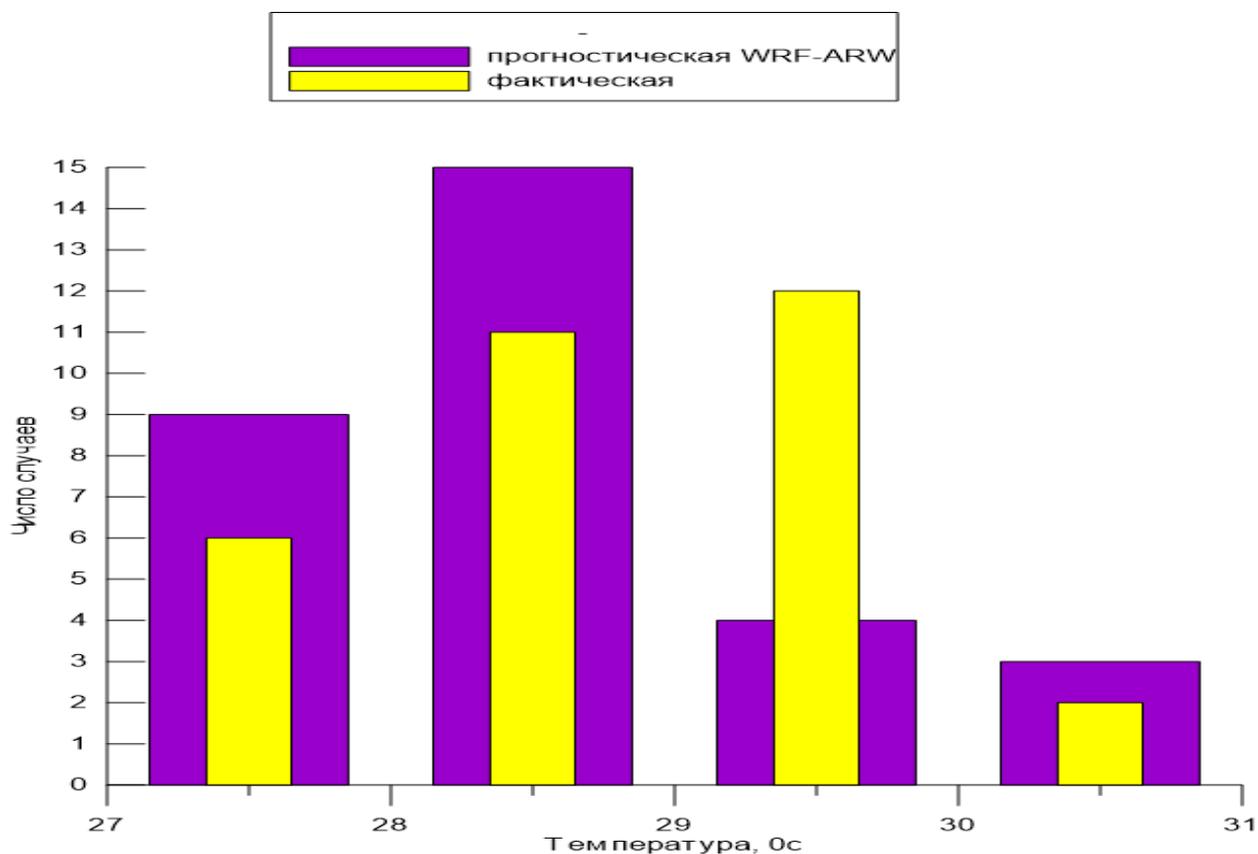


Рисунок 3.40 - Изменение максимальной температуры в июле 2018 на станции Мусаса

На рисунок 3.40 представлена гистограмма, на которой показано число случаев появления значений максимальной температуры в июле 2018 на станции Мусаса. По фактическим данным, с большой вероятностью максимальная температура находится в диапазоне от 29⁰С до 30⁰С и появляется 12 раза. согласно прогностическим данным, с большой вероятностью максимальная температура находится в диапазоне от 28⁰С до 29⁰С числом случаев 15. Согласно прогностическим и фактическим данным, с меньшей вероятностью наблюдается максимальная температура в диапазон от 30⁰С до 31⁰С.

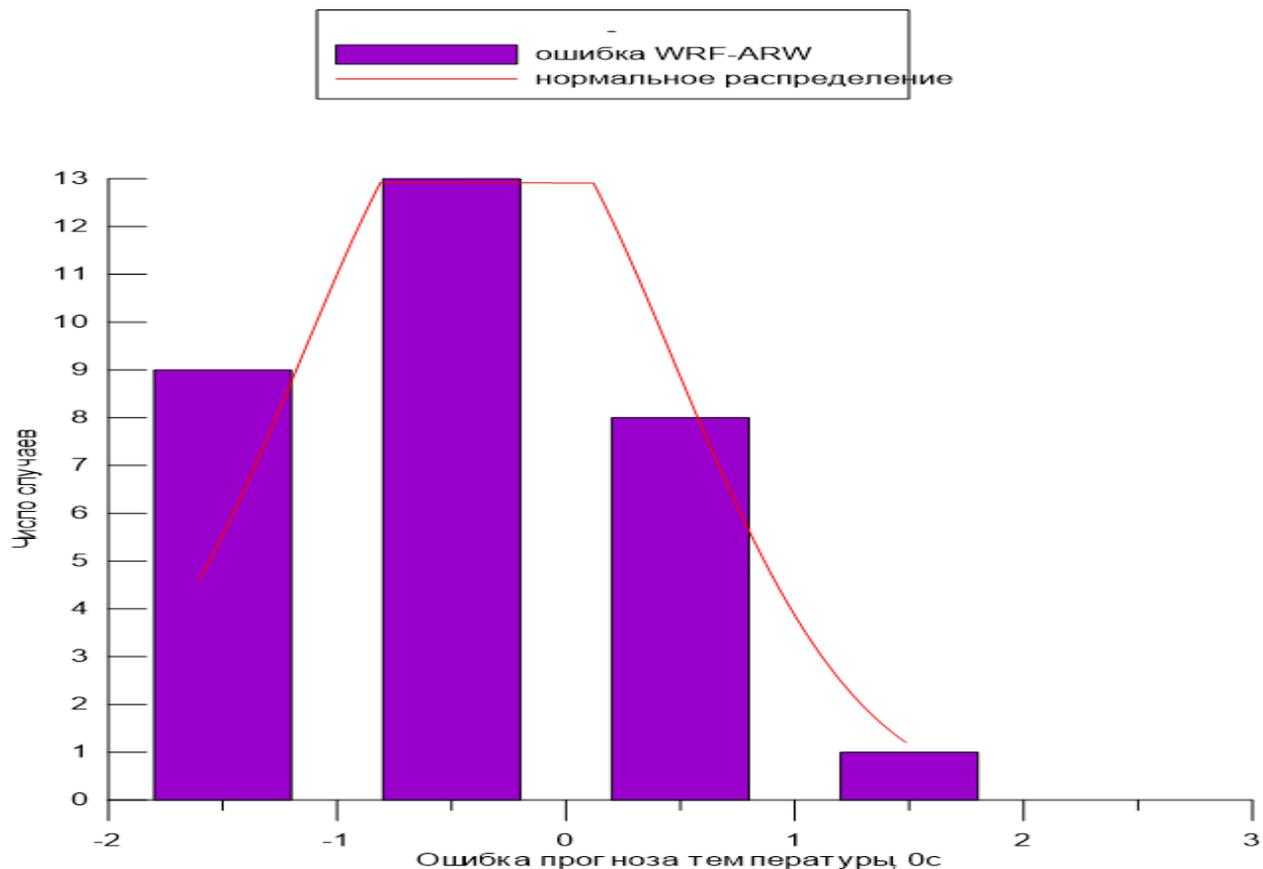


Рисунок 3.41 – Изменение ошибок максимальной температуры в июле 2018 на станции Мусаса

Рисунок 3.41 представляет собой гистограмму, на которой показано число случаев появления диапазона значения ошибки прогнозирования максимальной температуры в июле 2018 на станции Мусаса с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. согласно этой гистограмме, ошибка прогнозирования максимальной температуры, приводящая к неоправдываемости не наблюдается.

Согласно дисперсионного анализа прогноз максимальной температуры на станции Мусаса в июле 2018 был успешно потому что дисперсия прогностических значений максимальной температуры меньше дисперсия фактических значений максимальной температуры. Значения дисперсия прогностических, фактических значений максимальной температуры и межгрупповая дисперсия указаны в таблице 3.22.

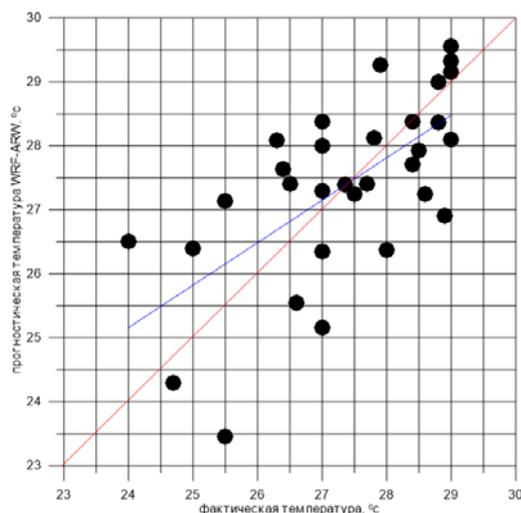


Рисунок 3.42 – Диаграмма рассеивания максимальной температуры в июле 2018 на станции Мусаса.

На рисунке 3.42 представлена диаграмма рассеивания, на которой показано, как произошел бы идеальный прогноз, если не было бы ошибки в прогнозе с мезомасштабной модели WRF-ARW. Направление идеального прогноза не совпадает с направлением реального прогноза из-за ошибок, которые наблюдаются в результате прогнозирования. Красная линия показывает, как был бы идеальный прогноз при отсутствии ошибок прогноза. Тем не менее, можно говорить, что прогноз хорошо потому что линия идеального прогноза не сильно отличается от линии фактического прогноза.

Таблица 3.22 – среднее значение минимальных температур и дисперсия в июле 2018 на станции Мусаса

фактическая средняя температура	28.9 ⁰ С
прогностическая средняя температура	28.6 ⁰ С
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	28.8 ⁰ С
Межгрупповая дисперсия	0.0298
Дисперсия фактической максимальной температуры	0.7933

Дисперсия температуры	прогностической	максимальной	0.592
--------------------------	-----------------	--------------	-------

3.1.3. Оценка гидродинамического прогноза количества осадков на станции Мусаса

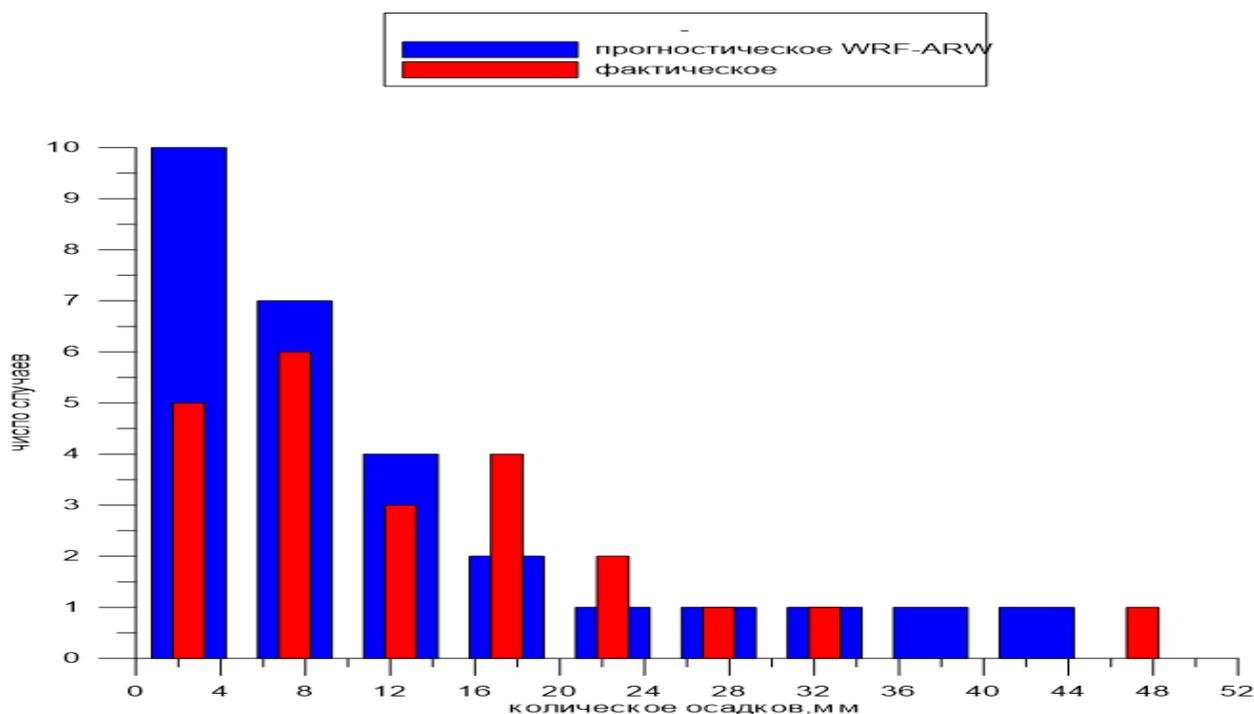


Рисунок 3.43 - Изменение количества осадков в апреле 2018 на станции Мусаса

Гистограмма, показанная на рисунке 3.43 показывает, что прогностические данные об осадках преимущественно иллюстрируют вероятностное количество осадков в диапазоне от 0 до 4 мм в сутки. Мало вероятностное количество осадков наблюдается в диапазоне от 20 до 44 мм за сутки.

Согласно той же гистограмме, фактическое количество осадков наблюдалось с большой вероятностью на станции Мусаса в апреле 2018 в диапазонах от 6мм до 10мм в сутки. По факту, мало вероятностное количество осадков наблюдается в диапазоне от 26 до 48 мм за сутки.

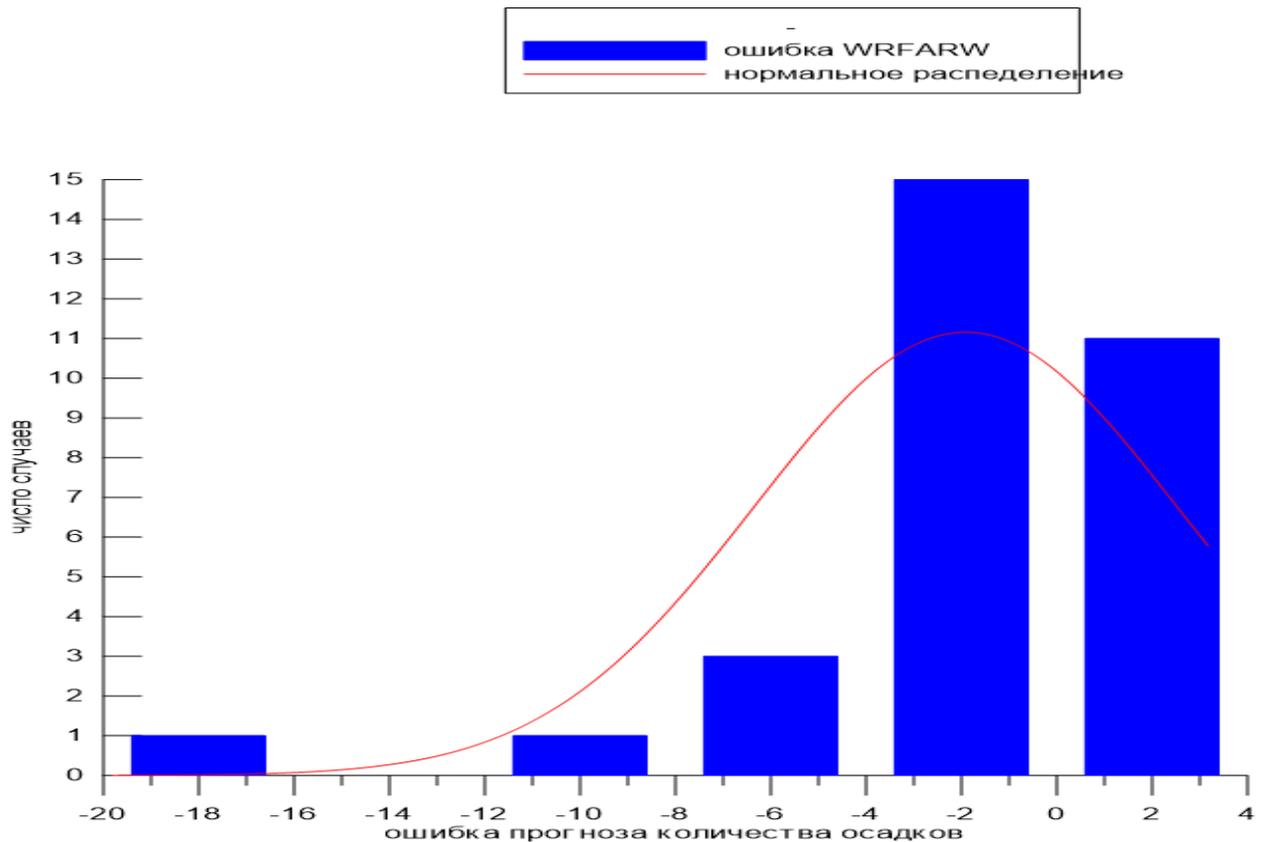


Рисунок 3.44 - Изменение ошибок прогноза количества осадков в апреле 2018 на станции Мусаса

Гистограмма, приведённая на рисунке 3.44, показывает, что вероятностная ошибка прогноза количества осадков находится в диапазоне от -4 мм до 0 мм в сутки. Мало вероятностная ошибка прогноза количества осадков наблюдается в диапазоне от -20 мм до -16 мм за сутки.

Расчитанные значения дисперсий прогностического и фактического количества осадков позволяют делать вывод об успешности прогноза поскольку дисперсия прогностического количества осадков меньше дисперсии фактического количества осадков.

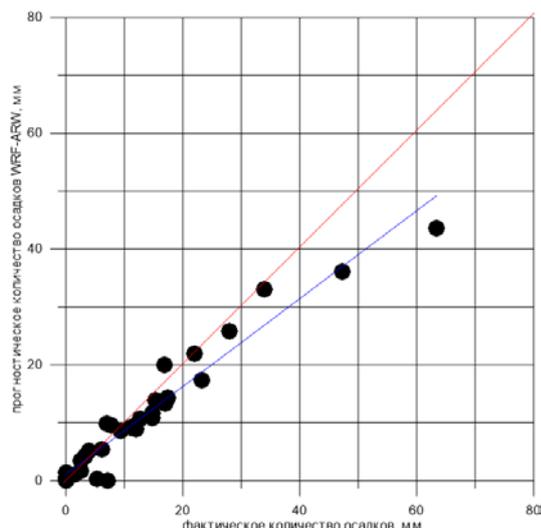


Рисунок 3.45 – Диаграмма рассеивания количества осадков в апреле 2018 на станции Мусаса

На рисунке 3.45 показано как прошел бы прогноз количества осадков на станции Мусаса в апреле 2018 если не было бы ошибки. Красная линия соответствует идеальному прогнозу, а синяя линия соответствует реальному прогнозу с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW.

Таблица 3.23 – среднее значение количества осадков и дисперсия в июле 2018 на станции Мусаса

фактическое среднее количество осадков	12.6мм
прогностическая среднее количество осадков	10.7мм
Дисперсия фактического количества осадков	212.9
Дисперсия прогностического количество осадков	130.7
Средняя ошибка	1,95мм

Таблица 3.24 –статистические критерии для оценки количества осадков в апреле 2018 на станции Мусаса

статистические характеристики	значение
<i>ME</i>	-58.6
<i>MAE</i>	58.6
<i>RMSE</i>	26.9
<i>RE</i>	285.4
<i>CORR_{P,F}</i>	0.97

Из таблицы 3.6 видно, что коэффициент корреляции имеет высокое значение. Согласно классификации коэффициентов корреляции по шкале Чеддока, связь между фактическими и прогностическими количествами осадков очень высокая и соответственно понятно, что ряд фактического и прогностического количества осадков очень сильно связаны и меняются в одном направлении.

Таблица 3.25 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений в апреле 2018 на станции Мусаса

		Наблюдение случая		
		A	ET	
Прогноз случая	A	3		28
	ET			2

	24	6	30
--	----	---	----

По данной матрице сопряженности, рассчитаны индексы, с помощью которых можно доказать качества прогнозирования количества осадков с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. Значения этих индексов представлены в таблице 3.26.

Таблица 3.26— индексы для оценки прогноза количества осадков в апреле 2018 на станции Мусаса

Индекс	значение
BIAS	1.17
FAR	0.18
POD	0.96
TS	0.79
E	22.4
GSS	0.01

По полученным индексам в таблице 3.26, можно сделать следующие выводы:

-мезомасштабная модель WRF-ARW завышает количество наблюдаемых осадков в апреле 2018 на станции Мусаса поскольку коэффициент BIAS больше 1.

-ложная тревога при прогнозе с помощью модели WRF-ARW имеет доля 0.18.

- доля правильного моделирования на станции Гитега составляет 0,96

-доля всех прогнозируемых или наблюдаемых событий, которые были правильными 0,79.

-прогноз количества осадков имеет точность до 0,01.

Исходя из анализа количества осадков на станции Мусаса, можно ввести следующую классификацию:

- А:0- 1 мм/сутки – градация слабых осадков (ГСО) было/не было.
- В: 1-5 мм/сутки – градация умеренных осадков (ГУО).
- С:5-20 мм/сутки – градации сильных осадков (ГСИО).
- D: больше 20 мм /сутки – градация очень сильных осадков (ГОСО).

Таблица 3.27— Число случаев появления градации по прогнозированным и фактическим значениям количества осадков на станции Мусаса

Градация количества осадков	Число случаев появления градации по прогнозированным значениям количества осадков	Число случаев появления градации по фактическим значениям количества осадков
А	7	6
В	5	5
С	13	13
D	5	6

По таблице 3.27 видно, что при прогнозе количества осадков на станции Мусаса успешно прошел поскольку прогнозируемые градации интенсивности осадков, почти соответствуют фактическим градациям интенсивности количества осадков.

3.4. Оценка качества гидродинамического прогноза для станций Руийги

3.4.1 Оценка гидродинамического прогноза температуры на станции Руийги

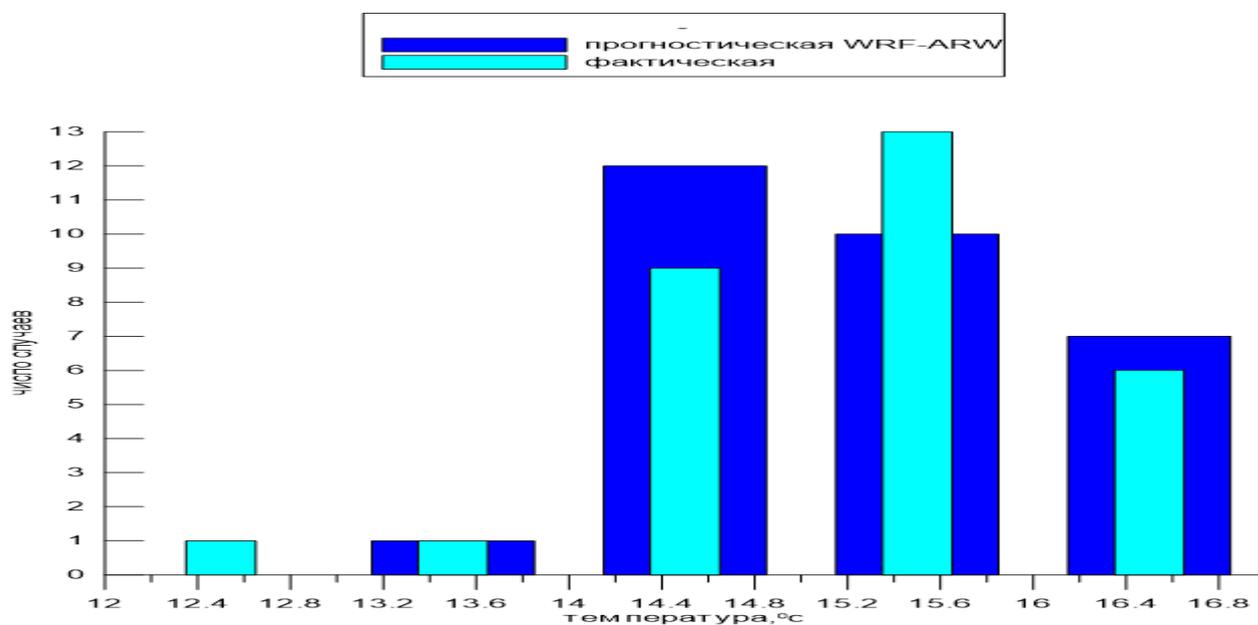


Рисунок 3.46 - Изменение минимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги

Гистограмма, приведённая на рисунке 3.46, позволяет увидеть частоту появления диапазона значения минимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги. Согласно фактическим данным, минимальная температура, наблюдающаяся с большой вероятностью, находится в диапазоне от 15⁰С до 16⁰С и появляется 13 раз. Прогноз показывает, что минимальная температура, наблюдающаяся с большой вероятностью, находится также в диапазоне от 14⁰С до 15⁰С и появляется 12 раза. Прогностические данные показывают, что с меньшей вероятностью будет наблюдаться одна раз минимальная температура в диапазон от 13⁰С до 14⁰С. Фактические данные позволяют увидеть, что с меньшей вероятностью будет наблюдаться минимальная температура в диапазоне от 12⁰С до 13⁰С.

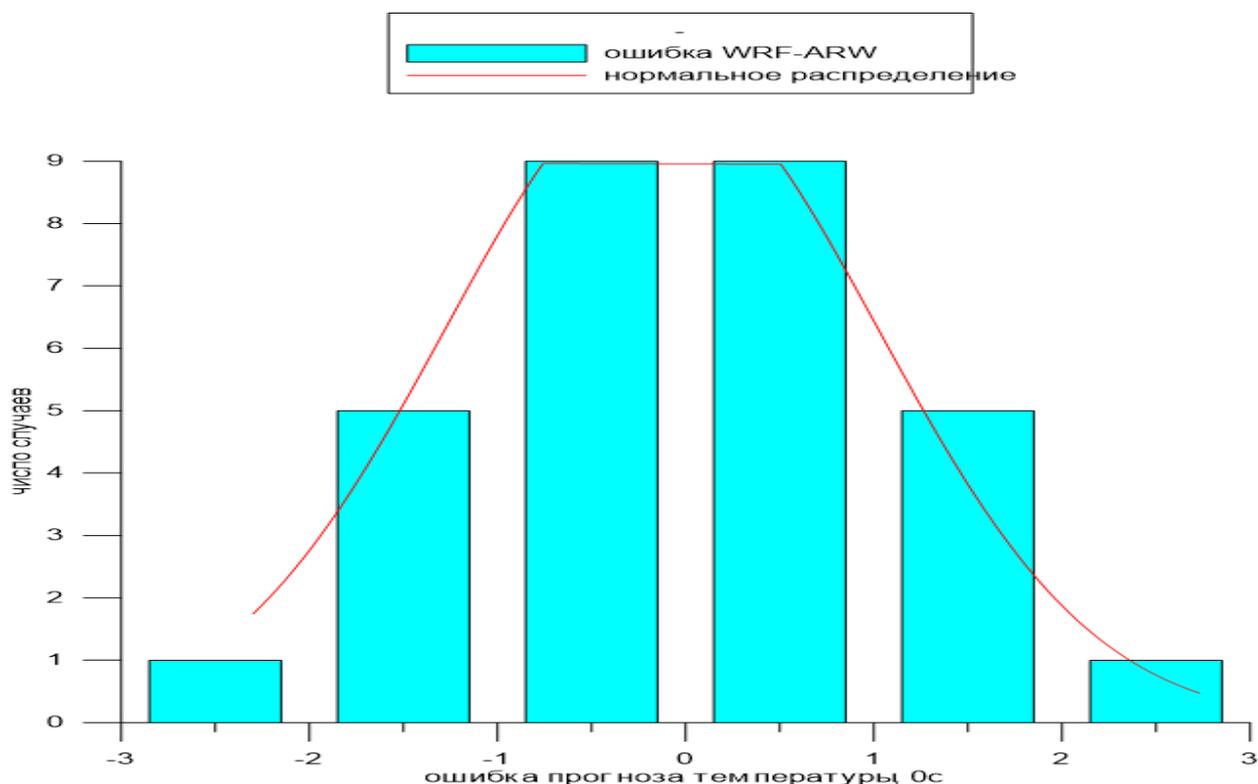


Рисунок 3.47 – Изменение ошибок минимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги

Рисунок 3.47 представляет собой гистограмму, на которой отображена частота появления значения ошибок прогнозирования минимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. Рисунок 3.47 показывает, что значения ошибок прогнозирования, приводящие к неоправдываемости прогноза, наблюдаются в диапазонах от -3°C до -2°C и от 2°C до 3°C и появляются всего лишь 2 раза.

Дисперсионный анализ минимальных значений минимальных температур (таблицы 3.28) по прогноз и по факту для станции Руийги в апреле 2018 иллюстрирует успешность прогноза с помощью модели WRF-ARW поскольку дисперсия фактических значений минимальной температуры больше дисперсии прогностических значений.

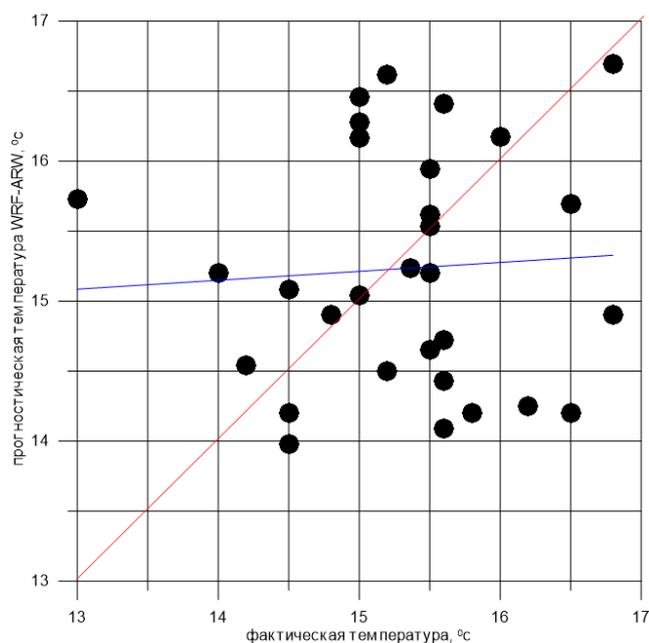


Рисунок 3.48 – Диаграмма рассеивания минимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги

Рисунок 3.48 представляет собой диаграмму рассеивания минимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги и иллюстрирует как произошел бы идеальный прогноз если не было бы ошибки в прогнозе с мезомасштабной модели WRF-ARW. Синяя линия показывает изменение минимальной температуры по прогнозу модели WRF-ARW. Красная линия показывает направление идеального прогноза.

Таблица 3.28 – среднее значение минимальных температур и дисперсия в апреле 2018 на станции Руийги

фактическая средняя температура	15.4 ⁰ С
прогностическая средняя температура	15.2 ⁰ С
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	15.3 ⁰ с
Межгрупповая дисперсия	0.0041
Дисперсия фактической минимальной температуры	0.7183
Дисперсия прогностической минимальной	0.69201

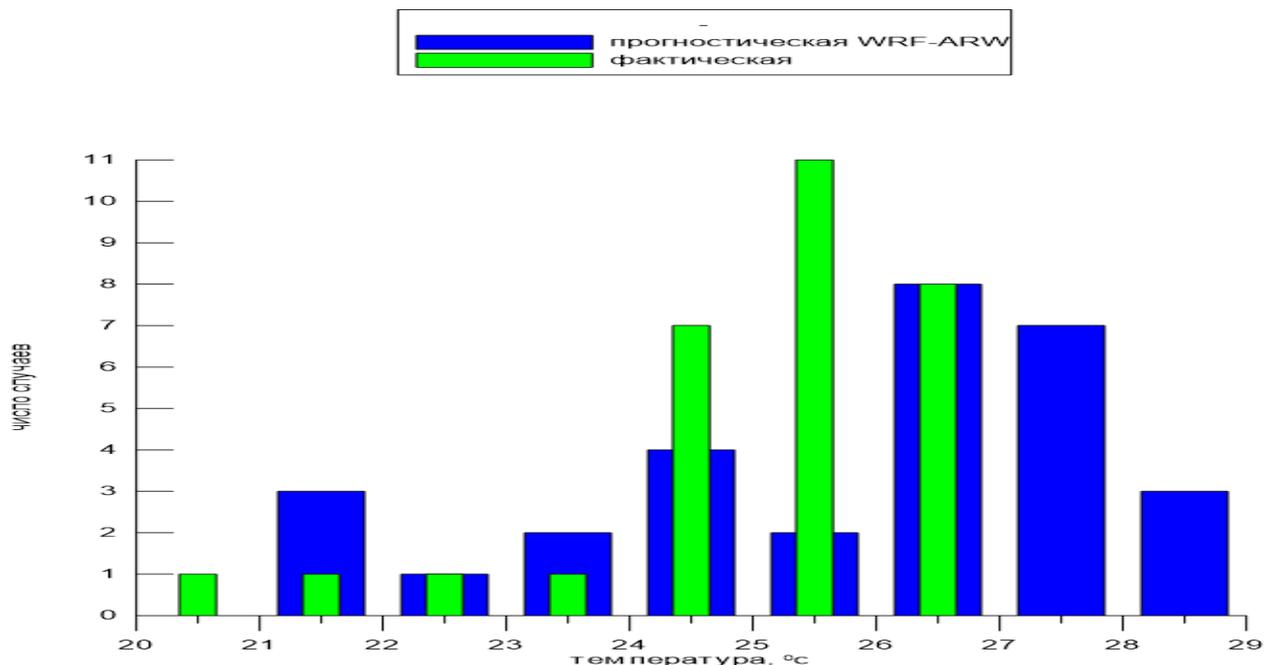


Рисунок 3.49 - Изменение максимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги

Согласно гистограмме, представленной на рисунке 3.49 в апреле 2018 на станции Руийги, фактические данные максимальной температуры, с большой вероятностью находится в диапазоне от 25⁰С до 26⁰С и появляется 11 раз. По прогностическим данным, с большой вероятностью максимальная температура находится в диапазоне от 26⁰С до 27⁰С и появляется 9 раз. С меньшей вероятности, прогностические и фактические данные показывают, что максимальная температура соответственно наблюдается в диапазонах от 22⁰С до 23⁰С и 20⁰С до 24⁰С.

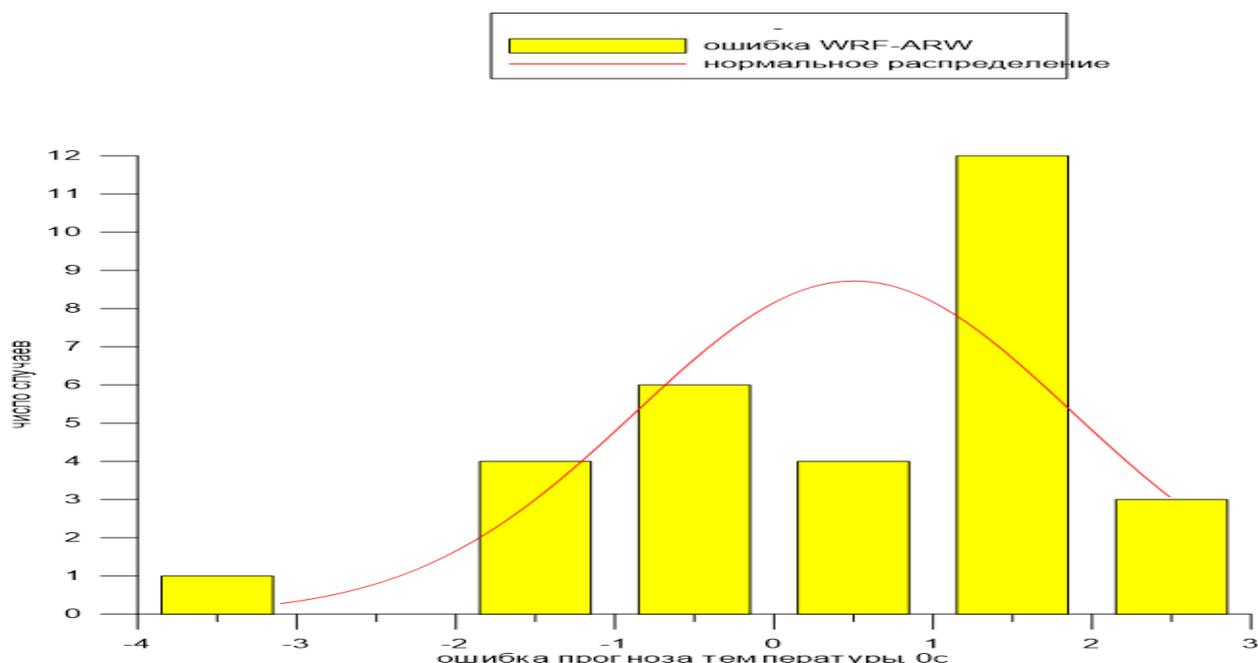


Рисунок 3.50 – Изменение ошибок максимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги

Согласно рисунку 3.50, ошибка прогнозирования, приводящие к неоправданности прогноза максимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги наблюдаются в диапазонах от -4°C до -3°C и от 2°C до 3°C и появляются всего 4 раза.

По значениям дисперсий фактической максимальной температуры и дисперсии прогностической максимальной температуры заметно, что прогноз максимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги был не успешно так как дисперсия фактической максимальной температуры меньше дисперсии прогностической максимальной температуры. Значения дисперсий находятся в таблице 3.29.

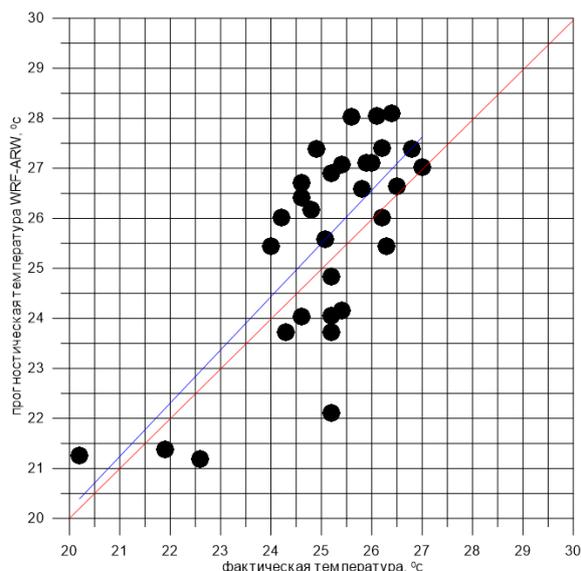


Рисунок 3.52 – Диаграмма рассеивания максимальной температуры в апреле 2018 на станции Руийги

На рисунке 3.52 показано как произошел бы прогноз если не было бы ошибки в прогнозе с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. На диаграмме, синяя линия показывает изменение температуры по прогнозу модели WRF-ARW, а красная показывает, как пошел бы прогноз если не был бы ошибки. Тем не менее, направление идеального и реального прогноза намного похоже.

Таблица 3.29 – среднее значение максимальных температур и дисперсия в апреле 2018 на станции Руийги

фактическая средняя максимальная температура	25.1 ⁰ С
прогностическая средняя максимальная температура	25.6 ⁰ С
средняя температура между фактическими и прогностическими данными.	25.3 ⁰ С
Межгрупповая дисперсия	0.06
Дисперсия фактической максимальной температуры	2,04
Дисперсия прогностической максимальной температуры	4.19

3.4.2 Оценка гидродинамического прогноза количества осадков на станции Руийги

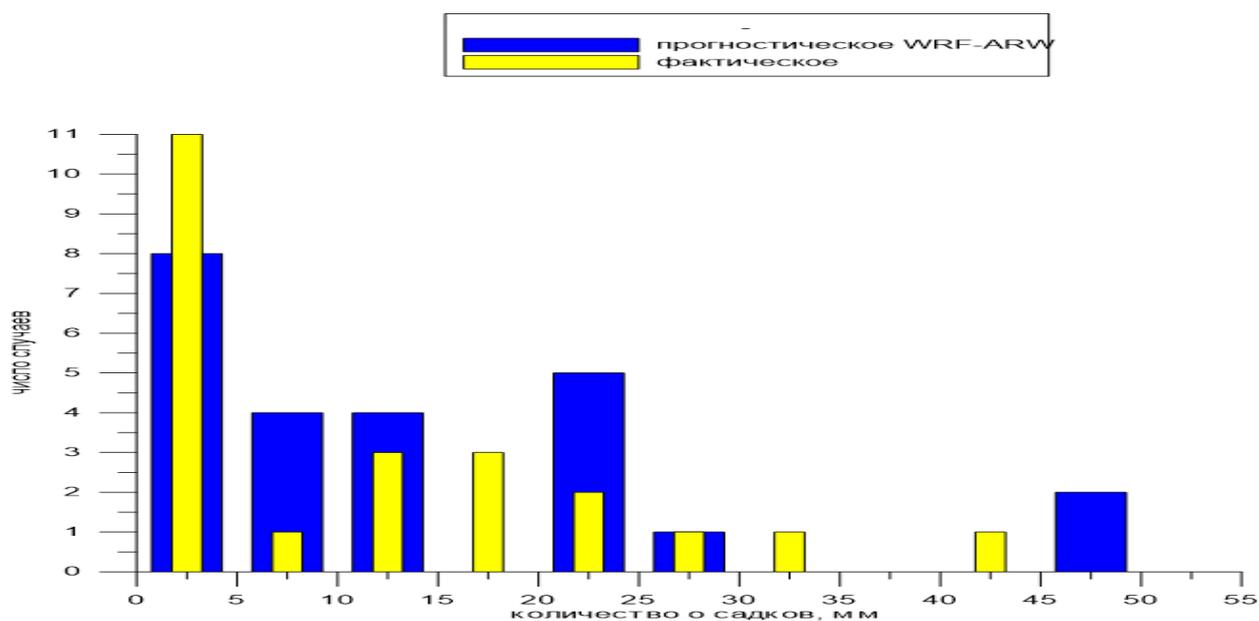


Рисунок 3.53 - Изменение количества осадков в апреле 2018 на станции Руийги

Согласно гистограмме, представленной на рисунке 3.53, прогнозируемые данные об осадках преимущественно иллюстрируют вероятностное количество осадков в диапазоне от 0 до 5 мм в сутки. Мало вероятностное количество осадков наблюдается в диапазоне от 25 до 30 мм за сутки. Фактическое количество осадков наблюдалось тоже с большой вероятностью на станции Руийги в апреле 2018 в диапазонах от 0 мм до 5 мм в сутки. По факту, мало вероятностное количество осадков наблюдается в диапазоне от 25 до 45 мм за сутки.

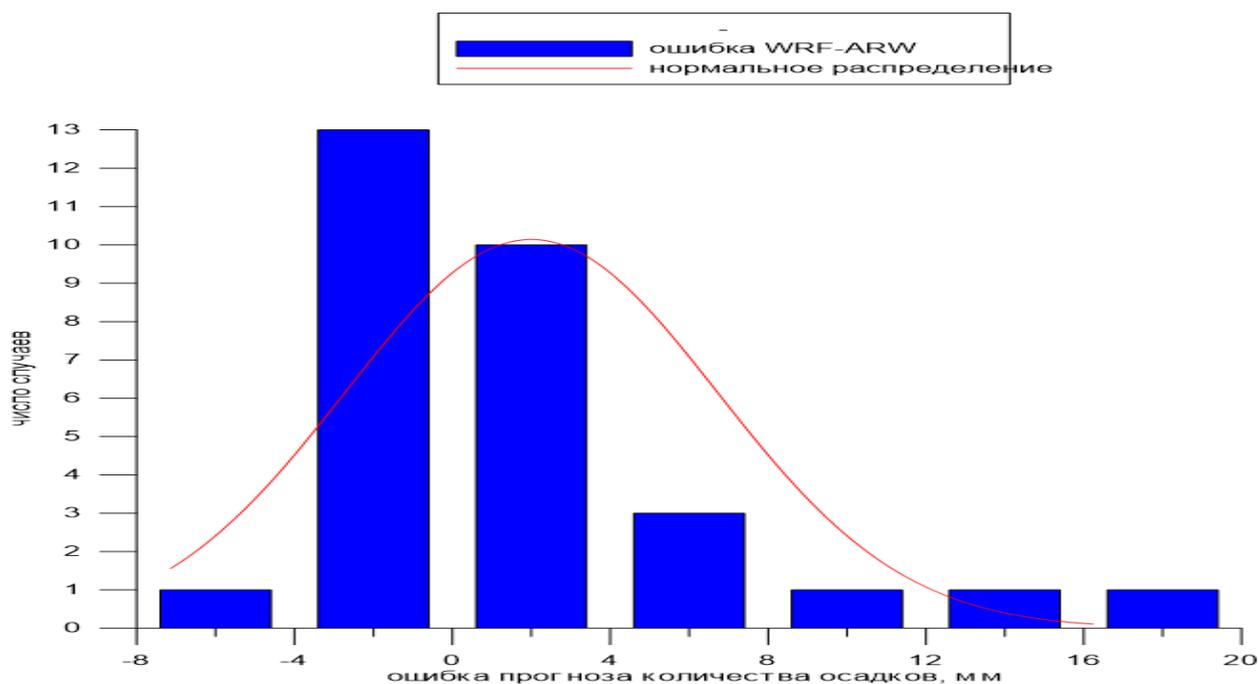


Рисунок 3.54 - Изменение ошибок прогноза количества осадков в апреле 2018 на станции Руийги

Гистограмма рисунка 3.54 показывает, что вероятностная ошибка прогноза количества осадков находится в диапазоне от -4 мм до 0 мм в сутки. Мало вероятностная ошибка прогноза количества осадков наблюдается в диапазоне от -20 мм до -16 мм за сутки.

Согласно значениям дисперсий прогностического и фактического количества осадков, прогноз количества осадков на станции Руийги не был успешно поскольку дисперсия прогностического количества осадков больше дисперсии фактического количества осадков (таблица 3.30).

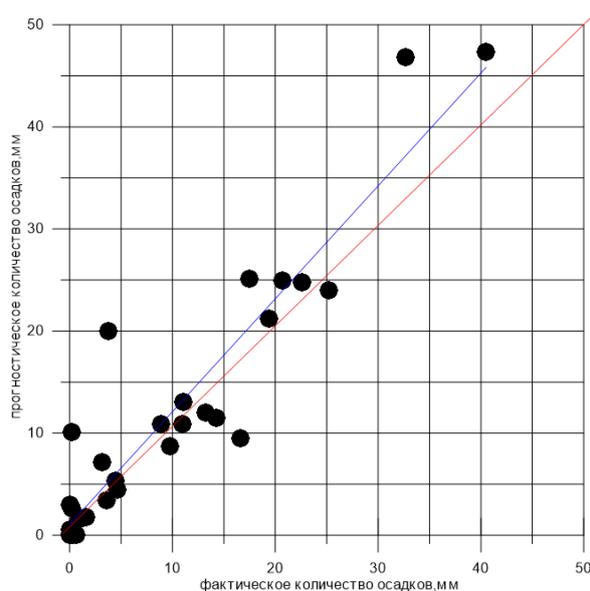


Рисунок 3.55 – Диаграмма рассеивания количества осадков в апреле 2018 на станции Руийги

На рисунке 3.55 показано, как прошел бы прогноз количества осадков на станции Руийги в апреле 2018 если не было бы ошибка. Красная линия соответствует идеальному прогнозу, а синяя линия соответствует реальному прогнозу с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. Данная диаграмма показывает, что реальный прогноз чуть отличается от идеального прогноза. Тем не менее, в большинстве случаев, прогнозируемое явление обнаружено по факту хотя иногда обнажилось расхождение в интенсивности явления.

Таблица 3.30 – Среднее значение количества осадков и дисперсия в июле 2018 на станции Руийги

фактическое среднее количество осадков	8.9мм
прогностическая среднее количество осадков	10.9мм
Дисперсия фактического количества осадков	10,9
Дисперсия прогностического количество осадков	12,8
Средняя ошибка	1.9 мм

Таблица 3.31 –Статистические критерии для оценки количества осадков в апреле 2018 на станции Руийги

статистические характеристики	значение
<i>ME</i>	59.9
<i>MAE</i>	59.9
<i>RMSE</i>	28.1
<i>RE</i>	7325.9
<i>CORR_{P,F}</i>	0.93

По таблице 3.31 видно, что коэффициент корреляции имеет высокое значение. По классификации коэффициентов корреляции по шкале Чеддока, связь между фактическими и прогностическими количествами осадков очень высокая и соответственно понятно, что ряд фактического и прогностического количества осадков очень сильно связаны и меняются в одном направлении.

Таблица 3.32 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений в апреле 2018 на станции Руийги

		Наблюдение случая		
		A	ET	
Прогноз случая	A	1		24
	ET			6
		3		30

По матрице сопряженности (таблица 3.32), рассчитаны индексы, с помощью которых можно доказать качества прогнозирования количества осадков с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW. Значения этих индексов представлены в таблице 3.33.

Таблица 3.33- Индексы для оценки прогноза количества осадков в апреле 2018 на станции Руийги

Индекс	значение
BIAS	1.043
FAR	0.125
POD	0.913
TS	0.808
E	18.4
GSS	0.0585

По полученным индексам в таблице 3.33, можно сделать следующие выводы:

-мезомасштабная модель WRF-ARW завышает количество наблюдаемых осадков в апреле 2018 на станции Руийги поскольку коэффициент BIAS больше 1.

-ложная тревога при прогнозе с помощью модели WRF-ARW имеет доля 0.125.

- доля правильного моделирования на станции Руийги составляет 0,913

-доля всех прогнозируемых или наблюдаемых событий, которые были правильными 0,808.

-прогноз количества осадков имеет точность до 0,058.

Исходя из количества осадков на станции Руийги, можно

ввести следующую классификации:

- А:0- 1 мм/сутки – градация слабых осадков (ГСО) было/не было.
- В: 1-5 мм/сутки – градация умеренных осадков (ГУО).
- С:5-20 мм/сутки – градации сильных осадков (ГСИО).
- D: больше 20 мм /сутки – градация очень сильных осадков (ГОСО).

Таблица 3.34 - Число случаев появления градации по прогнозированным и фактическим значениям количества осадков на станции Руийги

Градация количества осадков	Число случаев появления градации по прогнозированным значениям количества осадков	Число случаев появления градации по фактическим значениям количества осадков
А	7	6
В	5	5
С	13	13
D	5	6

Согласно таблице 3.34 видно, что при прогнозе количества осадков на станции Руийги успешно прошел поскольку прогнозируемые градации интенсивности осадков, почти соответствуют фактическим градациям интенсивности количества осадков несмотря на то что наблюдается противоречии по дисперсионному анализу.

Заключение

В рамках данной ВКР (магистерская диссертация) проведена адаптация мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW к региону исследований (республика Бурунди) и к задаче исследований (прогноз осадков).

Проведены численные эксперименты по моделированию полей метеорологических величин для двух характерных месяцев.

Осуществлена верификация результатов моделирования - оценено качество прогноза температуры воздуха и количество осадков для Бурунди на четырёх станциях, расположенных в разных областях. Оценка сделана с помощью статистических критериев, позволяющих оценивать успешность прогнозирования с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW.

В результате оценки, сделаны следующие выводы:

- было обнаружено, что прогноз максимальных значений температуры оправдался в всех четверых станциях.
- было определено, что прогноз минимальных значений температуры оправдался для всех станций, кроме станции Бужумбура.
- было установлено, что модель WRF-ARW подходит для прогноза количества осадков на всех четырёх станциях, кроме станции Руийги.
- выявлена сильная корреляционная связь между рядами фактического и прогностического количества осадков.
- заметно, что мезомасштабная модель WRF-ARW завышает количество осадков в апреле 2018 на всех станциях в Бурунди поскольку рассчитанные коэффициенты BIAS больше 1 везде.

Для улучшения качества прогнозов в дальнейшем предполагается провести ассимиляцию данных наблюдений и выбрать оптимальную комбинацию параметризаций физических процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Dr Stefan Liersch, Rocio Rivas, Kerstin Fritzsche- Rapport sur le changement climatique au Burundi. Режим доступа: https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/changement_climatique_au_burundi_r%C3%A9sum%C3%A9_fr_1.pdf
2. WRF Meteorological Modeling In Support Of Regional Air Quality Modeling for the 2011 Base Year. Режим доступа: <https://www.pdfdrive.com/wrf-meteorological-modeling-in-support-of-regional-air-quality-modeling-for-the-2011-base-year-d34926027.html>
3. WRF Model Physics Options and References. Режим доступа : https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_references.html
4. Белоусов С.Л. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды :Гидрометеиздат, 1986 г.. Часть 1

Приложение

В данном приложении, указаны используемые формулы для выполнения данной работы.

Таблица 13 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений

		Наблюдение случая		
		Да	Нет	
Прогноз случая	Да	A	B	A + B
	Нет	C	D	C + D
		A + C	B + D	N

По матрице сопряжённости были рассчитаны следующие индексы:

- BIAS – отношение между количеством прогнозируемых событий и количеством наблюдаемых событий. Этот индекс демонстрирует завышение ($BIAS > 1$) или занижение ($BIAS < 1$) моделью количества наблюдаемых событий. $BIAS = 1$ означает совпадение числа прогнозируемых и наблюдаемых случаев осадков. BIAS не является мерой точности и необязательно $BIAS = 1$ соответствует идеальному прогнозу.

$$BIAS = \frac{A + B}{A + C} \quad (3.7)$$

- FAR – это доля прогнозируемых событий, которые были предсказаны, но не наблюдались (ложная тревога). Лучший результат соответствует $FAR = 0$, а наихудший при $FAR = 1$. $FAR = 0$ не обязательно соответствует совершенным прогнозам.