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 диссертация)

На тему: «Исследование качества долгосрочного ансамблевого прогноза»

Исполнитель **Аксенова Мария Евгеньевна**
(фамилия, имя, отчество)

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

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 26 » мая 2024 г.

Санкт–Петербург
2024

Содержание

Введение 3
1. Долгосрочные прогнозы 5
1.1 Методы долгосрочного прогнозирования 7
1.2 Ансамблевый прогноз 8
1.2.1 Процессы ансамблевого прогнозирования 9
1.2.2 Органы ВМО (Всемирной Метеорологической Организации), отвечающие за мониторинг информации, касающейся ансамблевого прогнозирования (глобального и по ограниченному району) 11
1.3 Критерии, используемые для верификации прогностических моделей . 15
1.4 Система прогнозирования Global Ensemble Forecast System (GFS) 24
2. Анализ долгосрочных прогнозов 27
2.1 Анализ качества прогнозов 28
2.2 Сравнение прогнозов членов ансамбля с фактическими значениями температуры 36
2.3 Анализ характеристик качества ансамблевого прогноза 45
Заключение 61
Список используемых источников 62
Приложения 64

Введение

Улучшение качества прогноза представляет собой одну из ключевых задач прогностической науки. Особенно этот вопрос важен для прогнозов на долгосрочный период.

Ансамблевый прогноз, как один из методов генерации долгосрочных вероятностных прогнозов, учитывает неточности гидродинамического моделирования атмосферных процессов и позволяет синоптику на основе вероятностных данных дать более качественный прогноз, что делает его достаточно значимым и актуальным направлением для исследования.

При этом разработка, интерпретация и оценка качества долгосрочного ансамблевого прогноза очень сложна и неоднозначна.

Таким образом, целью данной работы является исследование качества долгосрочного ансамблевого прогноза на основе данных системы GEFS для осеннего периода 2023 года.

Для достижения заданной цели необходимо выполнить ряд задач:

Собрать архив данных долгосрочного ансамблевого прогноза;

Провести анализ данных ансамблевого прогноза;

Сравнить получившиеся результаты с фактическими данными за рассматриваемый период;

Провести анализ характеристик качества ансамблевого прогноза;

Сделать вывод о качестве ансамблевого прогноза.

Объектом исследования является результат ансамблевого прогноза температуры воздуха на высоте двух метров в Санкт-Петербурге за осенний период 2023 года.

Предметом исследования являются прогностические значения температуры воздуха на высоте двух метров в Санкт-Петербурге в осенний период 2023 года на срок до 35 суток.

Структура выпускной работы: данная работа включает в себя введение, 2 главы, разделённые на подглавы, заключение, список используемых источников и приложения.

Первая глава посвящена основным теоретическим понятиям, необходимых для проведения данного исследования, а именно: долгосрочный прогноз, методы долгосрочного прогнозирования, ансамблевое прогнозирование, критерии, используемые для верификации модели, система прогнозирования Global Ensemble Forecast System (GEFS). Во второй главе проводится анализ ансамблевого прогноза температуры воздуха на высоте двух метров в Санкт-Петербурге в осенний период 2023 года при помощи характеристик оценки качества ансамблевого прогноза. В заключении были сделаны основные выводы по результатам исследования.

1. Долгосрочные прогнозы

Прогнозом погоды называется составленное на основе обоснованных предположений ожидаемое состояние погоды, которое может быть представлено в словесном или графическом формате [1].

По заблаговременности прогнозы можно разделить на 4 большие группы:

- краткосрочный – прогноз на срок от 2 до 72 часов;
- среднесрочный – прогноз на срок от 3 до 30 суток;
- долгосрочный – прогноз на период от 30 суток до двух лет;
- прогноз климата [2].

При этом долгосрочный прогноз и прогноз климата не являются прогнозами погоды, так как и не ориентированы на предсказание конкретной метеорологической величины в конкретный момент времени.

Долгосрочные прогнозы подразделяются на:

- Месячный ориентировочный – прогноз с описанием осредненных метеорологических параметров, которые выражены в виде отклонения (девиация, колебание, аномалия) от климатических величин для этого месяца (не обязательно для предстоящего месяца);
- Трехмесячный или 90-суточный ориентировочный – прогноз с описанием осредненных метеорологических параметров, выраженных в виде отклонения от климатических величин для этого 90-суточного периода (не обязательно для предстоящего 90-суточного периода);
- Сезонный ориентировочный – прогноз с описанием осредненных метеорологических параметров, выраженных в виде отклонения от климатических величин для этого сезона. При этом сезон может определяться как трехмесячный сезон года (зимний, весенний и т.д.), так и как сезон с

большей продолжительностью, например, сезон дождей в тропических регионах [2].

Долгосрочное прогнозирование является одним из наиболее актуальных и значимых направлений современной науки. Сферами общественной жизни, в которых наиболее востребованы долгосрочные прогнозы, являются сельское хозяйство, строительство, жилищно-коммунальное хозяйство, транспорт, торговля, лесная отрасль и т.п.

На данный момент оправдываемость прогнозов на длительный период не высока, примерно 65%. Причина заключается в том, что изменение притоков тепла в атмосфере зависит от трех факторов – адвекции температуры, вертикального теплообмена и внешнего притока тепла к атмосфере. Первые два вида притоков тепла связаны только с внутренним состоянием атмосферы. Третий вид притока – учитывает приток тепла к атмосфере на верхней и нижней границах (космическое пространство и подстилающая поверхность Земли соответственно) [3].

При заблаговременности прогноза до пяти суток изменения температуры на 80-100% определяется внутренними факторами. При заблаговременности прогноза около 5 суток влияние начального состояния атмосферы и внешних притоков тепла примерно одинаково, т.е. по 50%. Прогнозы на месяц практически не зависят от начальных условий в атмосфере (вклад не более 10-15%), а притоки тепла извне определяют будущее состояние атмосферы на 85-90% [3].

Внешние факторы могут усиливать или уменьшать притоки энергии к атмосфере по сравнению с климатической нормой либо аномально перераспределять его в пространстве. Учет этих факторов – достаточно сложная задача, решение которой до сих пор остается актуальной проблемой [3].

Также неотъемлемым атрибутом любого прогнозирования является неопределенность прогнозов. Основными причинами неопределенности

атмосферных процессов являются: хаотичное состояние атмосферы, ограниченность возможностей в области наблюдения за атмосферой и моделирования её состояния, ошибки интерпретации данных наблюдений и результатов моделирования [4].

Атмосфера является хаотичной средой, чрезвычайно чувствительной к незначительным возмущениям. Этот факт, в свою очередь, влияет на проблему точного описания текущего состояния атмосферы, что создает трудности при создании прогнозов погоды [4].

1.1 Методы долгосрочного прогнозирования

Большинство существующих методов долгосрочных метеорологических прогнозов можно разделить на четыре больших класса в соответствии с заложенными в них физическими принципами и математическими основами:

Синоптические методы – используют закономерности преобразования барических образований и последовательную смену крупномасштабных особенностей циркуляции атмосферы.

Физико-математические методы – используют статистические связи между будущими аномалиями состояния атмосферы и физически обоснованными влияющими факторами.

Статистические методы – используют закономерности временной динамики временных рядов гидрометеорологических характеристик атмосферы и их полей.

Гидродинамические (или численные) методы – основаны на решении системы гидродинамических уравнений атмосферы с изменяющимися во времени граничными условиями [3].

На данный момент, гидродинамические методы считаются самыми перспективными, так как в их основе лежат математические модели атмосферы, которые основаны на законах физики и учитывают полный спектр происходящих в атмосфере процессов.

При этом численные решения гидродинамических уравнений являются неустойчивыми и достаточно чувствительными к изменениям начальных условий, методам описания подсеточных процессов, выбору численных схем расчета и пространственного и временного разрешения.

При задании исходных начальных полей так или иначе имеют место мелкомасштабные ошибки, которые могут неограниченно возрастать во времени и искажать прогнозируемую динамику крупномасштабных метеорологических процессов [5].

Гидродинамические модели принято разделять на 2 основных вида: детерминированные (жестко связывающие физическими законами прогностические поля с начальными данными) и ансамблевые. В данной работе рассматривается ансамблевый подход для долгосрочного прогноза.

1.2 Ансамблевый прогноз

Ансамблевый прогноз – это вероятностный, альтернативный прогноз, который разрабатывается на основе анализа набора прогностических состояний атмосферы (ансамбля), которые получают за счёт разных условий, используемых при прогнозе, в данной работе при моделировании [4].

Принцип ансамблевого подхода лежит в использовании различных методов учёта неопределённостей гидродинамического прогноза и предполагает последовательный расчёт по численной гидродинамической модели для различных условий моделирования.

Один из вариантов (самый простой) интерпретации прогноза по методу ансамблей можно представить в виде единственного прогностического поля путем взвешенного осреднения всех членов ансамбля. Результирующее среднее прогностическое поле дает более точный результат, чем каждая из составляющих ансамбля по отдельности.

Существует 3 основных типа ансамблевого прогноза:

1. Мультимодельный ансамбль, формируемый за счет использования нескольких моделей – включает в рассмотрение одновременно прогностические поля нескольких гидродинамических моделей (в основном применяется в краткосрочных прогнозах и при составлении сезонных прогнозов);

2. Ансамбль по начальным условиям – ансамбль формируется за счёт разных начальных условий. Различные правдоподобные начальные условия создают, возмущая исходные данные (данные анализа), от которых рассчитывается прогноз, и получают набор прогнозов, благодаря расчету от каждого возмущенного начального условия своё прогностическое поле;

3. Ансамбль, формируемый за счёт разных параметризаций физических процессов – создание набора прогностических полей с различной комбинацией параметризаций физических процессов [4].

Развитие ансамблевого прогнозирования обязано постоянному усовершенствованию вычислительной техники и, в частности, появлению суперкомпьютеров, которые открыли новые возможности для многократного выпуска прогнозов погоды.

1.2.1 Процессы ансамблевого прогнозирования

Процесс ансамблевого прогнозирования принято разделять на три стадии:

1. Ансамблевый предпроцессор, в котором проводится ассимиляция, корректировка и вероятностное задание входной метеорологической информации;

2. Прогноз (процессор), то есть сама модель, с помощью которой проводится выпуск прогнозов и различные способы задания её параметров;

3. Постпроцессор, где вероятностные гидрометеорологические прогнозы корректируются с учетом имеющихся измерений прогнозируемых величин и требований к качеству прогнозов.

В предпроцессоре в прогнозы вводятся поправки на основе сравнения этих прогнозов с измеренными величинами, используемыми в качестве входной информации. Данные поправки позволяют устранить систематические ошибки метеорологических прогнозов.

При построении постпроцессора проводится попытка устранения систематических смещений статистических оценок, полученных с помощью ретроспективных ансамблевых прогнозов и по данным наблюдений [5].

Существует три способа устранения подобного смещения:

1. Вводятся поправки в каждый член ансамбля на основании ранее определенных отношений наблюдаемого значения и прогностической величины к среднему по ансамблю прогнозу за период заблаговременности прогноза;

2. Смещение устраняется с помощью использования регрессионной связи между прогнозируемыми и наблюдаемыми данными;

3. Для устранения смещения используются интегральные вероятностные распределения прогностических и наблюдаемых данных и для заданных вероятностей превышения прогнозируемые величины заменяются равнообеспеченными наблюдаемыми.

Все три метода дали близкие результаты и значительное улучшение качества прогноза [5].

Также в постпроцессоре поводятся такие процессы как:

- формирование информации в удобный для потребителя вид; верификация модели;
- прогноз отдельных явлений (так как в модели прогнозируются только определенные значения метеорологических величин, а не конкретные явления погоды);
- корректировка результатов моделирования;
- даунскейлинг – процедура получения метеорологических параметров на мелкой сетке по данным более грубой сетки в соответствии с определенными правилами и учетом природных условий рассматриваемого региона.

При определении возможной заблаговременности прогноза и оценки риска его использования необходимо выбирать соответствующие показатели качества прогнозов. Для вероятностных прогнозов используется несколько показателей с учетом требований потребителя прогнозов. При выборе этих показателей необходимо обеспечить:

- надежность прогнозов (то есть близость рассматриваемого прогноза к средней по частоте прогнозируемого события, определенной по данным наблюдений за период верификации прогнозов),
- четкость (возможность оценивать вероятность событий),
- разрешительную способность (способность отличить относительную частоту появления прогнозируемого события при прогнозах от относительной частоты его появления по данным наблюдений за период верификации) [5].

1.2.2 Органы ВМО (Всемирной Метеорологической Организации), отвечающие за мониторинг информации, касающейся ансамблевого прогнозирования (глобального и по ограниченному району)

Центры, осуществляющие глобальный ансамблевый численный прогноз погоды (ЧПП) [6]:

1) разрабатывают глобальные ансамблевые прогностические поля основных метеорологических величин и потоков;

2) размещают посредством информационной системы ВМО (ИСВ) наборы этих видов продукции; перечень обязательной и настоятельно рекомендуемой для предоставления глобальной ансамблевой продукции ЧПП приводится в приложении 1.

3) предоставляют статистические данные ведущим центрам для верификации систем ансамблевого прогноза (САП);

4) представляют на веб-сайте обновленную информацию о характеристиках их глобальных САП.

Центры, осуществляющие ансамблевый ЧПП по ограниченному району [6]:

1)рассчитывают ансамблевые прогностические поля метеорологических величин и потоков по ограниченному району;

2) размещают посредством ИСВ архивы этих видов продукции; перечень обязательной и настоятельно рекомендуемой для предоставления ансамблевой продукции ЧПП по ограниченному району приводится в приложении 2;

3) выпускают статистические данные по верификации в соответствии со стандартом, адаптированные применительно к региону, охватываемому моделью, и предоставляют доступ к систематическому актуализированному графическому отображению результатов верификации на веб-сайте;

4) представляют на веб-сайте обновленную информацию о характеристиках их САП по ограниченному району.

Центры, координирующие деятельность по долгосрочному прогнозированию (ДП) на базе мультимодельных ансамблей (ведущие центры для ДПМА):

1) собирают согласованный набор прогностических данных региональных специализированных метеорологических центров (РСМЦ), принимающих участие в долгосрочном численном прогнозировании;

2) размещают на веб-сайте соответствующую минимальную информацию и дополнительную продукцию, а также прогнозы глобального численного долгосрочного прогнозирования (ГЦП-ДП) в стандартном формате;

3) дополнительно распространяют цифровые прогностические данные для тех центров (ГЦП-ДП), которые дают на это разрешение;

4) поддерживают архив составляемых в режиме реального времени прогнозов ГЦП-ДП и прогнозов на базе мультимодельных ансамблей;

5) поддерживают хранилище документации для системной конфигурации всех систем ГЦП-ДП;

6) выполняют верификацию продукции с использованием стандартной системы;

7) обеспечивают обратную связь с ГЦП-ДП по вопросам оценки эффективности моделей путем сравнения различных моделей и размещают на веб-сайте результаты верификации;

8) содействуют проведению исследований и получению опыта и знаний в области методов мультимодельного ансамблевого прогнозирования и обеспечивают руководство и поддержку по вопросам применения методов прогнозирования на базе мультимодельных ансамблей;

9) размещают информацию на веб-сайте Информационного бюллетеня по глобальному сезонному климату (ИБГСК) и поддерживают его архив.

Центры, осуществляющие координацию верификации САП [6]:

1) предоставляют возможности центрам Глобальной системы обработки данных и прогнозирования (ГСОДП), осуществляющим подготовку данных глобальных САП, для автоматического сохранения их статистических данных по стандартизированной верификации, а также обеспечивают доступ к этим статистическим данным по верификации;

2) поддерживают архив статистических данных по верификации, чтобы можно было обеспечивать выявление и отображение тенденций в эффективности работы;

3) осуществляют мониторинг получаемых статистических данных по верификации и проводят консультации с соответствующими участвующими центрами, если данные отсутствуют или являются сомнительными;

4) обеспечивают доступ к стандартным наборам данных, необходимым для выполнения стандартной верификации, включая климатологию и списки предусмотренных пунктов наблюдений, и поддерживают их обновление в соответствии с рекомендациями ИНФКОМ;

5) обеспечивают на своих веб-сайтах:

— соответствующее обновленное графическое отображение результатов верификации, поступающих от участвующих центров, за счет обработки получаемых статистических данных;

— соответствующую документацию, включая доступ к стандартным процедурам, необходимым для выполнения верификации, а также ссылки на веб-сайты участвующих центров ГСОДП;

— контактную информацию, с тем чтобы поощрять получение отзывов от НМГС и других центров ГСОДП в отношении полезности информации по верификации.

Ведущие центры для верификации САП должны также предоставлять доступ к стандартизированному программному обеспечению для расчета оценочной информации.

1.3 Критерии, используемые для верификации прогностических моделей

Показатель Брайера (BSS)

Показатель Брайера (Brier scores, BS) — это метод оценивания среднеквадратической ошибки вероятностных прогнозов для бинарных событий, например, наличие или отсутствие осадков. BS часто сложно интерпретировать. Следовательно, BS часто преобразовывают в Brier skill score (BSS), показатель способности, нормализуя показатель эталонного прогноза, к примеру, климатологического [7].

Наиболее общая формула для расчета BS это формула среднеквадратической ошибки [8]:

$$BS = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(f_t - o_t)^2, \qquad (1.1)$$

где

N – количество элементов, для которых был рассчитан показатель Брайера;

f_t – вероятность прогноза;

o_t – результат прогноза (1- если явление произошло, 0 – если нет).

BS равный 1 указывает на абсолютно не точный прогноз, в то время как 0 – на идеальный прогноз [7].

BSS рассчитывается по следующей формуле [8]:

$$\mathrm{BSS} = 1 - \frac{\mathrm{BS}}{\mathrm{BS}_{ref}}\ , \qquad (1.2)$$

где

BS_{ref} – BS для эталонного прогноза.

BSS имеет градацию от -∞ от 1. Отрицательное значение говорит о том, что прогноз менее точный чем стандартный прогноз; 0 – прогноз совпадает с эталонным; 1 – идеальный прогноз в сравнении с эталонным.

В итоге, BS используют для оценки точности прогноза, а BSS на сколько прогноз оказался точен в сравнении с эталонным [8].

Relative operative characteristic (ROC)

ROC AUC является популярным показателем для оценки бинарной классификации. Для ее вычисления необходимо определить площадь под ROC-кривой, которая показывает производительность классификации при различных пороговых значениях принятия решения [9].

ROC-кривая отображает долю выявленных истинных положительных результатов (TPR) в сравнении с долей ложных (ошибочных) положительных результатов (FPR).

Показатель ROC AUC — это площадь под ROC-кривой. Она суммирует, насколько хорошо модель может предоставлять относительные значения для положительных или отрицательных показателей по всем пороговым значениям классификации.

Показатель ROC AUC варьируется от 0 до 1, где 0,5 указывает на случайное угадывание, а 1 указывает на идеальную производительность модели.

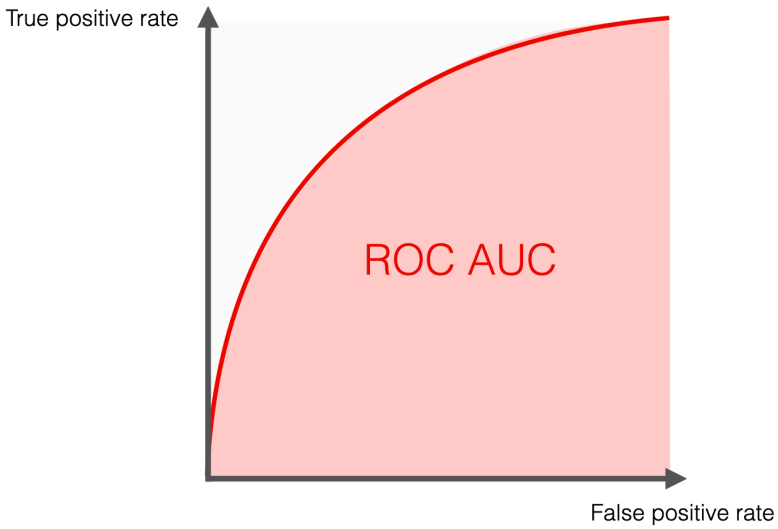

Рисунок 1.1 – Пример показателя ROC AUC. На графике по оси x – ложный положительный результат, по оси y – истинный положительный результат.

TPR и FPR можно вывести из матрицы ошибок или матрицы сопряженности (рисунок 1.2). Эта матрица суммирует все правильные и ложные прогнозы, сгенерированные для определенного набора данных.

С помощью этой матрицы TPR и FPR рассчитываются по формулам [10]:

$$TPR(x) = \frac{TP(x)}{TP(x)+FN(x)}, \quad (1.3)$$

$$FAR(x) = \frac{FP(x)}{FP(x)+TN(x)}, \quad (1.4)$$

где

TP (x) – true positive – прогноз о наличии явления x оправдался;

FP (x) – false positive – прогноз о наличии явления x не оправдался;

TN (x) – true negative – прогноз об отсутствии явления x оправдался;

FN (x) – false negative – прогноз об отсутствии явления x не оправдался;

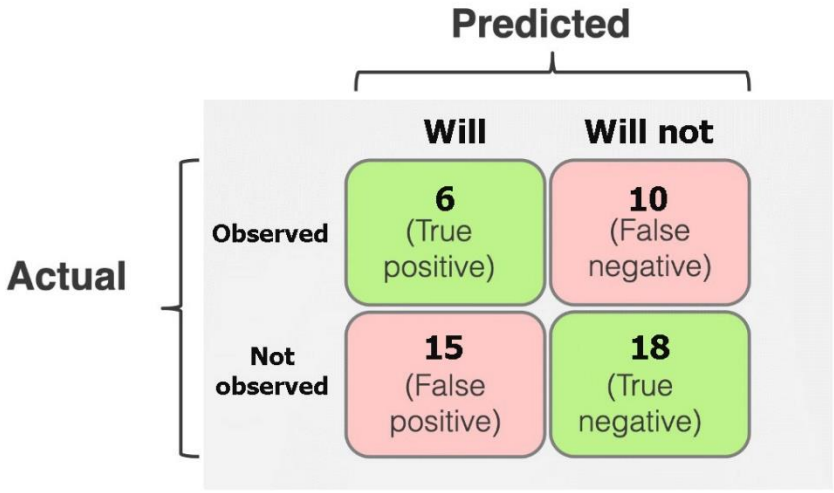

Рисунок 1.2 – Матрица сопряженности. Actual - фактические данные; predicted – прогностические данные; observed и not observed – наблюдаемое или не наблюдаемое явление соответственно; will и will not - прогноз наличия или отсутствия явления; true positive – истинное положительное значение, false negative – ложное негативное значение, false positive – ложное позитивное значение, true negative – истинное негативное значение.

Чтобы создать кривую ROC, необходимо сопоставить значения FPR со значениями TPR при различных пороговых значениях принятия решения.

Пороговые значения могут варьироваться в зависимости от потребностей пользователя. При изменении порогового значения будут меняться данные в матрице сопряженности.

При увеличении порогового значения модель будет считаться более консервативной и тогда метка оправдавшегося прогноза будет считаться более уверенной. Но как следствие будет обнаруживаться меньше примеров целевых значений.

При уменьшении порогового значения модель становится менее строгой, метка оправдавшегося прогноза будет присваиваться чаще, и она будет менее уверенной. Как следствие будет обнаруживаться больше примеров целевых значений. Это может привести к снижению точности, поскольку модель может давать больше ложных прогнозов.

TPR и FPR изменяются в одном направлении. Чем выше TPR, тем выше доля ложных положительных ошибок FPR; и наоборот, чем ниже TPR, тем меньше ложных срабатываний будет выдавать модель [9].

ROC-кривая иллюстрирует компромисс между TPR и FPR. Если модель не близка к идеальной, то данные показатели следует сбалансировать.

Для построения кривой необходимо отобразить значения FPR по оси X, а значения TPR по оси Y.

Левая сторона кривой соответствует более уверенным пороговым значениям – более высокий порог приводит к более низкому отзыву и меньшему количеству ложных положительных оценок.

Правая сторона представляет собой менее строгие сценарии при низком пороге. Доля истинных и ложных положительных срабатываний выше, в конечном итоге достигая 100%.

При увеличении порогового значения вы перемещаетесь влево по кривой, при уменьшении – вправо (рисунок 1.3).

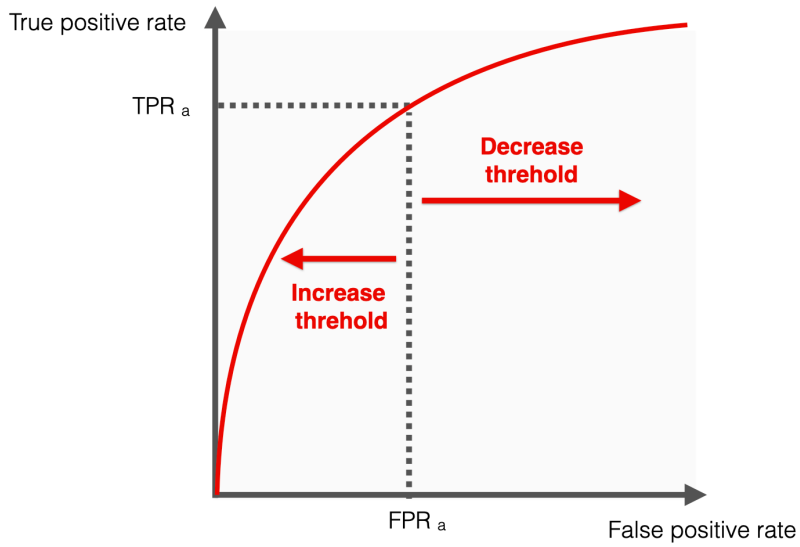

Рисунок 1.3 – Пример смещения кривой в зависимости от выбора порогового значения. На графике по оси x – ложный положительный результат, ось y – истинный положительный результат; increase threshold –

увеличение порогового значения; decrease threshold – уменьшение порогового значения

При идеальном сценарии, когда модель даёт верный прогноз в 100% случаев, TPR всегда равен 1, FPR всегда равен 0. При наихудшем сценарии модель дает абсолютно случайный результат. Тогда такая модель с равной степенью вероятности предсказывает как истинные и ложные вероятности. В таком случае кривая будет представлять из себя диагональ, соединяющая точки (0;0) и (1;1) [9].

Большинство реальных моделей находятся где-то между двумя крайними значениями (рисунок 1.4). Чем лучше модель может различать истинные и ложные значения, тем ближе кривая к верхнему левому углу графика.

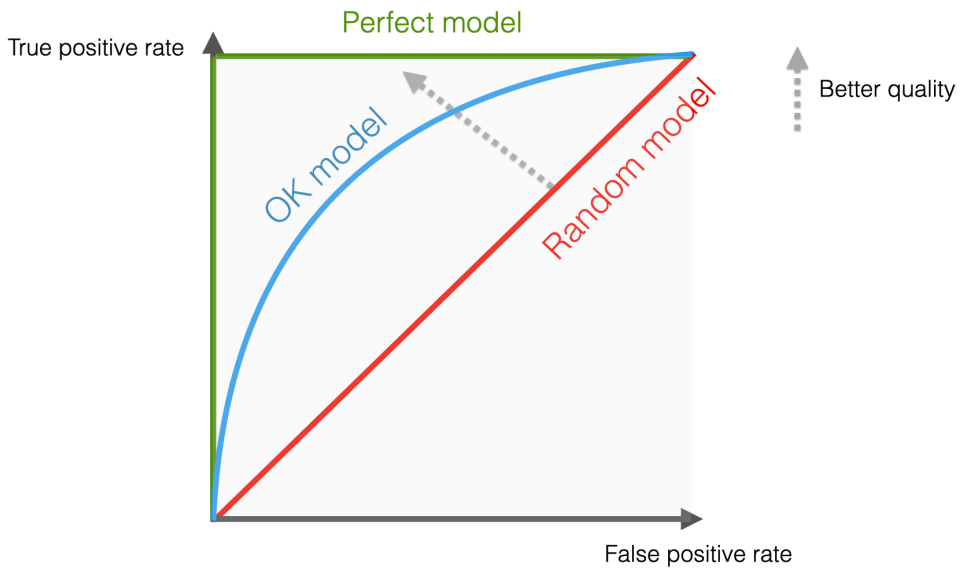

Рисунок 1.4 – Пример различных кривых ROC в зависимости от качества модели. На графике по оси x – ложный положительный результат, ось y – истинный положительный результат; perfect model – идеальная модель, OK model – нормальная модель, random model – модель, дающая случайный результат, better quality - более лучший результат

Как правило, показатель ROC AUC выше 0,8 является хорошим, 0,9 – отличным. Однако, качество модели зависит от конкретной проблемы и вариантов использования. Определенного стандарта не существует.

Интерпретация данного показателя находиться в контексте с другими показателями и по большей части зависит от интерпретации пользователя [9].

Достоинства ROC AUC:

- отображается одним значением. Удобно использовать при сравнении нескольких моделей;
- суммирует качество по различным пороговым значениям классификации;
- подходит для оценки несбалансированных данных, т.е. способен различать положительные и отрицательные значения независимо от их относительной частоты в наборе данных;
- масштабно-инвариантный, т.е. измеряет качество прогноза, а не абсолютные значения. Таким образом, это способствует сравнению качества моделей, которые могут выдавать разные диапазоны прогностических вероятностей.

Недостатки:

- Сложен в объяснении сторонним потребителям;
- Нет учета стоимости ошибок, т.е. не учитываются различные типы ошибок и их последствия. Иногда ложные отрицательные результаты могут быть более дорогостоящими, чем ложные положительные, и наоборот;
- Может ввести в заблуждение при сильном дисбалансе положительных и отрицательных классов данных. Когда положительный класс очень мал, ROC AUC может создать ложное впечатление о высоком качестве.

Лучше всего данный показатель подходит для:

- Сравнения нескольких моделей между собой;
- Ранжирования прогнозов в порядке достоверности;
- Получения как при оценке обучения модели, так и при оценке составления прогноза более полной картины производительности модели,

предоставляя единый показатель, который суммирует качество при различных пороговых значениях [9].

Так как ROC-кривая позволяет оценить прогноз только в рамках бинарной классификации (будет/не будет явление), была разработана система, для оценки нескольких вариантов развития событий – ROC movie (ROC – сюжет) [11].

ROC movie – содержит традиционные ROC-кривые для двоичных событий, которые соответствуют последовательно более высоким пороговым значениям для более значимого результата.

При построении ROC-кривых проводится весовая оценка каждой кривой, то есть оценивается их значимость. В результате возникает UROC-кривая (universal ROC) – универсальная ROC-кривая, которая визуализирует взвешенное среднее по всем ROC-кривым.

Площадь под UROC – кривой, которая, как и AUC, показывает производительность классификации при различных пороговых значениях принятия решения, принято называть CPA (coefficient predictive ability) – коэффициент прогностической способности (рисунок 1.5) [11].

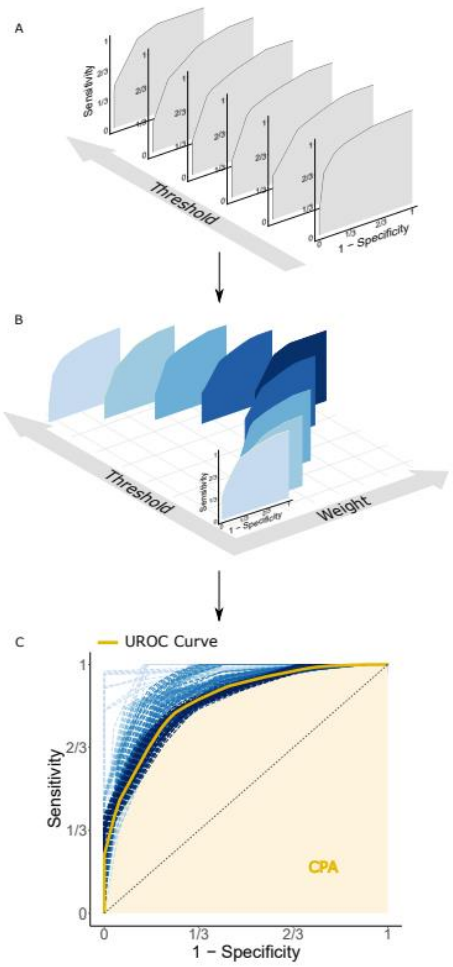

Рисунок 1.5 – Построение ROC-movie, универсальной UROC-кривой и коэффициента прогностической способности. На графиках по оси x – особенность, по оси y – чувствительность; threshold – пороговое значение, weight – вес, UROC curve – универсальная ROC-кривая, CPA – coefficient predictive ability – коэффициент прогностической способности (A) ROC-movie комплектуется из традиционных ROC-кривых бинарных событий, которые соответствуют более высоким пороговым значениям наиболее значимых результатов. (B) Отдельные ROC-кривые оцениваются относительно их весовой значимости; более темные цвета указывают на более высокие веса. (C) Рассчитывается UROC-кривая как взвешенное среднее ROC-кривых; CPA равняется площади под UROC-кривой и допускает альтернативные интерпретации.

Данный коэффициент достаточно широко используется в разных сферах научной деятельности. ВМО предписывает использование ROC-кривых для проверки (бинаризованных) долгосрочных температурных прогнозов

1.4 Система прогнозирования Global Ensemble Forecast System (GFS)

В данной работе исследуются возможности ансамблевого подхода для описания развития и эволюции процессов в определенный период времени (35 суток). Для этой цели были использованы результаты моделирования системы Global Ensemble Forecast System (GEFS)– Глобальная ансамблевая система прогнозирования [https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc_new.php].

Это модель погоды, созданная Национальным центром прогнозирования окружающей среды (National Centers for Environmental Prediction, NCEP, США), которая генерирует 30 отдельных прогнозов (членов ансамбля) для устранения основных неопределенностей моделирования в начальных данных, например, таких как ограниченное число наблюдений, приборные погрешности или погрешности систем наблюдения, а также ограничения самой модели. GEFS позволяет количественно оценить эти неопределенности путем составления нескольких прогнозов (тридцать), которые, в свою очередь, дают набор возможных результатов, основанных на различиях или возмущениях, применённых к данным после их включения в модель. Каждый прогноз реализует различный набор неопределенностей [12].

Данные модели GFS не защищены авторским правом и предоставляется бесплатно в общественное достояние. Из-за этого модель служит основой для прогнозов многочисленных частных, коммерческих и иностранных метеорологических компаний [13].

В данной работе используется модель GFS.v16 (16 версия), которая была запущена в эксплуатацию 22 марта 2021 года.

Основные характеристики модели [14]:

- Шаг по пространству составляет 0,25° (примерно 25 км в средних широтах);

- По вертикали 127 уровней (до мезопаузы, примерно до 80 км). Модельные уровни представлены на рисунке 1.6. В данной работе используются данные о температуре воздуха на уровне 2 метров;
- Запускается 4 раза в сутки, в 00, 06, 12 и 18 часов по UTC. В данной работе использованы данные, полученные от запуска за 00 ч по UTC, так как только они дают прогнозы с заблаговременностью 35 суток (остальные – 16 суток);
- Более качественные навыки прогнозирования по сравнению с предыдущими версиями модели;
- Проводится расчет поглощения солнечного излучения в жидко-капельных облаках;
- Используются обновленные схемы микрофизики GFDL (The Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Лаборатории геофизической динамики жидкости) для вычисления радиуса ледового облака;
- Улучшенная оценка интенсивности, траектории и размера тропических циклонов, увеличение заблаговременности их прогноза (но при этом отмечается тенденция к усилению всех тропических циклонов при долгосрочном прогнозировании);
- Значительно продвинутый количественный прогноз осадков;
- Улучшенные прогнозы низких значений температуры воздуха и как следствие способность оценивать холодные воздушные массы и связанные с ними погодные события;
- Продвинутый расчет теплового потока на поверхности снежного покрова; ввод влияния растительности на поверхностный энергетический баланс в городских районах;
- Связь атмосферной модели с Global Wave Modal - глобальной волновой моделью (WaveWatch III);
- Связь с Global Land Data Assimilation System (GLDAS) - Глобальной системой ассимиляции данных с поверхности суши, что позволяет увеличить

площадь рассматриваемых территорий, в том числе используя Climate Prediction Center (CPC) – центр прогнозирования климата;

- Высокая точность расчета турбулентности: включение процессов влажности, EDMF-параметризация (the eddy-diffusivity mass-flux – вихревой поток диффузии) для учета турбулентности в верхних слоях кучево-дождевой облачности, осведомленность о площади распространения турбулентности, взаимодействие турбулентной кинетической энергии с конвекцией кучевой облачности;
- На данный момент наблюдается плохое качество моделирования квазидвухлетнего колебания (КДК); КДК-подобная характеристика отображается в «климате» модели с использованием диссипации гравитационных волн;
- Использование сезонного цикла испарения влаги в стратосфере;
- Используемая система ассимиляции – ансамблевый фильтр Калмана;
- Добавлена параметризация для подсеточного масштаба нестационарного гравитационного сопротивления;
- Данные предоставляются в формате netCDF в сжатом виде;
- У данной модели «холодный старт» для получения каждого члена ансамбля;
- Методом генерации ансамбля является введение возмущений в начальные поля каждого члена ансамбля;
- Возмущения генерируются методом «выращивания возмущений» (разница контрольного прогноза и 6-часового прогноза прошлого цикла).

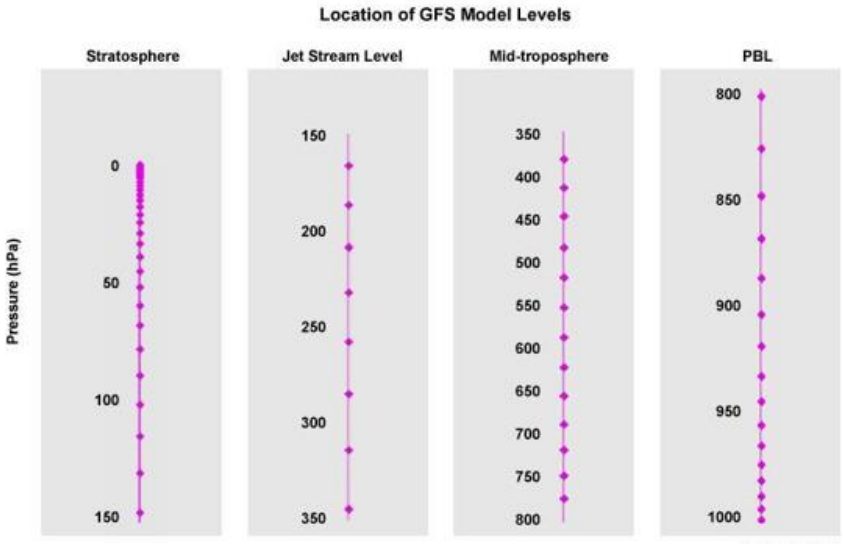

Рисунок 1.6 – Расположение уровней модели GFS. По вертикали – давление в гПа; первый столбец – уровни в стратосфере, 2 столбец – уровни в области струйного течения, 3 столбец – средняя тропосфера, 4 столбец – приземный слой

2 Анализ долгосрочных прогнозов

Результаты ансамблевого прогноза модели GFSv.16 выкладываются на сайте https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gens/prod/ ежедневно и сохраняются данные за трое последних суток.

Прогнозы разрабатываются от четырёх сроков в день – 00, 06, 12, 18 UTC. Каждый прогноз содержит данные атмосферной (папка atmos), волновой (папка wave) моделей и модели химии атмосферы (папка chem).

Результаты представлены с шагом 0.5^0 на модельных поверхностях (папка pgrb2bp5) и на изобарических поверхностях (папка pgrb2ap5). Также представлены результаты прогноза на подстилающей поверхности с шагом 0.25^0 (папка pgrb2sp25).

В папке init представлены начальные условия – возмущённые и для контрольного прогона модели.

С сайта можно получить данные прогноза на 840 часов (35 суток) при прогнозе от 00 UTC и на 384 часа (16 суток) при прогнозе от других сроков. В данных прогноза содержится информация о 30 членах ансамбля, среднем по ансамблю и дисперсии ансамбля.

Данные представлены в формате netcdf и кроме файлов данных можно получить индексные файлы (файлы метаданных). Пример индексного файла средних по ансамблю приведён в Приложении 1.

В данном исследовании рассматривается прогноз температуры воздуха на высоте 2 м. Рассматривается прогнозы за период с 13 сентября 2023 по 26 ноября 2024 года.

Для оценки качества прогноза используются фактические данные анализа модели GFS с сайта https://www.ncei.noaa.gov/data/global-forecast-system/access/grid-004-0.5-degree/analysis с тем же пространственным разрешением – шаг 0.5^0.

2.1 Анализ качества прогнозов

Первоначальные исследования имели цель оценить качество прогноза температуры воздуха в Санкт-Петербурге.

На основе данных модели GFSv.16 были построены графики долгосрочного ансамблевого прогноза температуры воздуха на высоте 2 м на 35 суток в Санкт-Петербурге за период начала прогноза с 13 сентября по 26 ноября 2023 года. Для каждого прогностического интервала на графиках представлены данные каждого из 30 членов ансамбля (серые кривые), среднее значение по ансамблю (красная кривая) и фактическое значение метеорологического параметра за рассматриваемый период времени (зеленая кривая).

Некоторые графики ведут себя похожим образом, их можно типизировать. Рассмотрим такие прогнозы на примере одного их них.

На рисунке 2.1 представлен график, иллюстрирующий прогноз от 13 сентября 2023 года. Анализ графика позволяет говорить о том, что среднее значения по ансамблю и фактическая температура воздуха достаточно близки при прогнозе на 6 суток – до 19 сентября. Затем ошибка прогноза увеличивается, среднее значение ансамбля начинает занижать значения температуры относительно фактических данных. На этом же прогностическом интервале наблюдается согласованность членов ансамбля.

На рисунке 2.2 представлены результаты прогноза и фактическое значение от 15 сентября. Анализируя графики можно обратить внимание на то, что модельное среднее в прогнозе с 19 по 25 сентября достаточно близко повторяет ход фактической температуры воздуха, но при этом её значения несколько занижены.

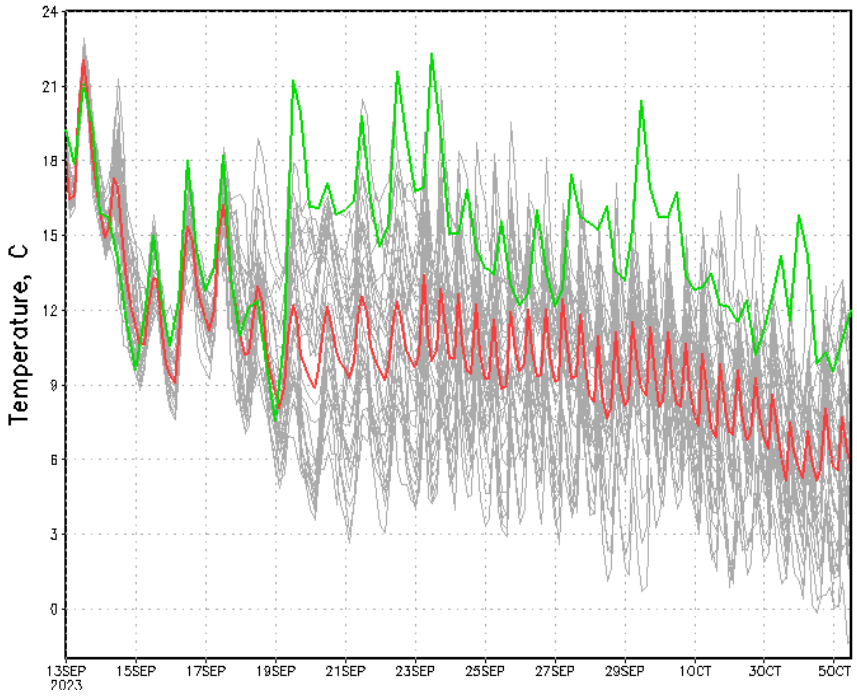

Рисунок 2.1 – Результаты ансамблевого прогноза температуры воздуха с 13 сентября по 18 октября 2023 года

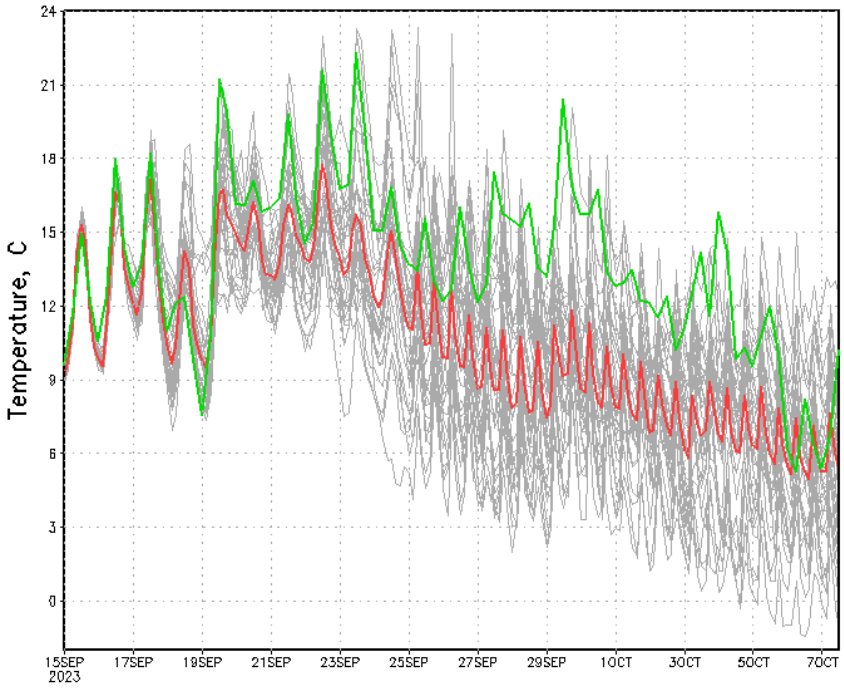

Рисунок 2.2 – График долгосрочного ансамблевого прогноза с 15 сентября по 20 октября 2023 года

На рисунке 2.3 представлен прогноз от 20 сентября. На графиках видно, что с начала прогноза до 29 сентября наблюдается достаточно близкий ход температуры модельной и фактической. Далее ход расходится, но наблюдается общая тенденция понижения температуры примерно до 11 октября.

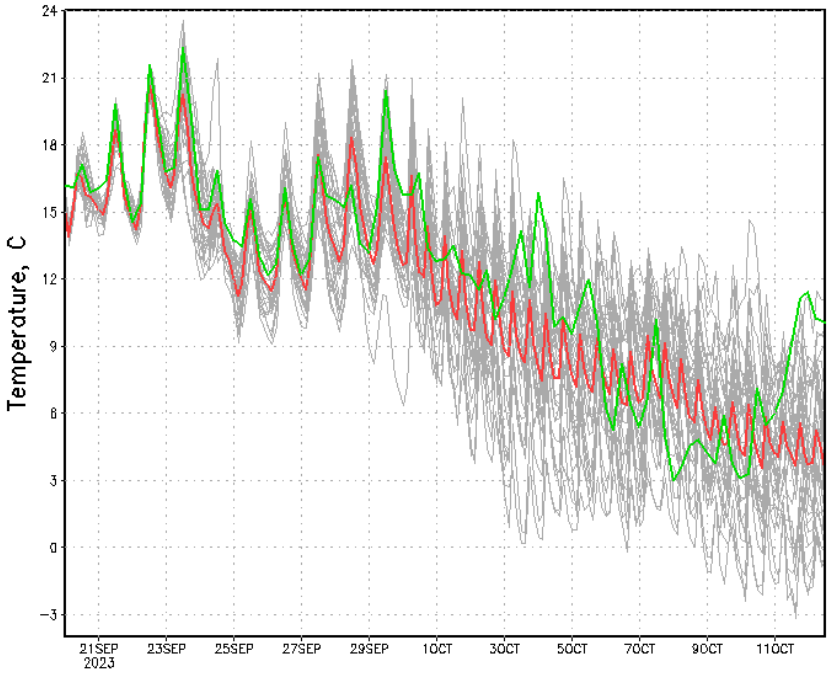

Рисунок 2.3 – График долгосрочного ансамблевого прогноза с 20 сентября по 25 октября 2023 года

Любопытная ситуация наблюдается при прогнозе от 29 сентября (рисунок 2.4). В период прогноза с 8 по 11 октября фактические значения показывают резкое понижение температуры до 3°C, а среднее значение по ансамблю наоборот показывает небольшое повышение значений примерно до 12°C. При этом несколько членов ансамбля достаточно близко спрогнозировали ход фактической температуры, но их количества оказалось недостаточно, чтобы повлиять на ход среднего значения по ансамблю. С 11 по 16 октября фактические значения показывают значительное повышение температуры до 15°C. В это время модель данных изменений не спрогнозировала, скорее наоборот – показала слабое понижение. Также можно обратить внимание на ход температуры воздуха с 16 по 21 октября. Значения среднего по модели и фактических данных достаточно близки друг к другу, наблюдается тенденция на понижение температуры.

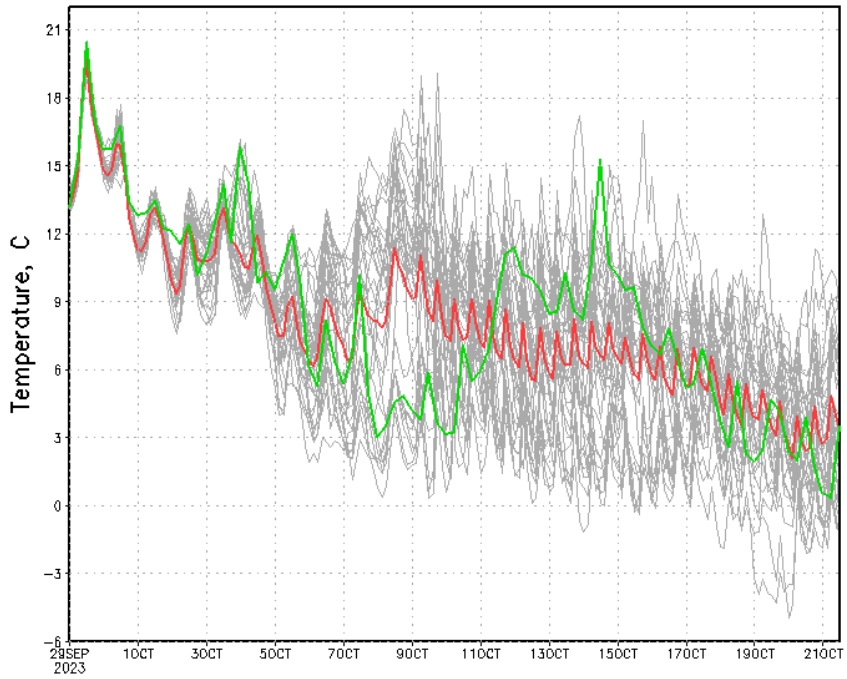

Рисунок 2.4 – График долгосрочного ансамблевого прогноза с 29 сентября по 3 ноября 2023 года

При прогнозе от 8 октября (рисунок 2.5) кривая фактических значений с самого начала выходит за границы ансамблевого прогноза (фактические данные температуры выше, чем данные ансамблевого прогноза), особенно за период с 13 по 17 октября. Затем фактические значения находятся «внутри» разброса членов ансамбля, за исключением периода с 21 по 23 октября. В период с 19 по 29 октября практически все члены модельного ансамбля прогнозировали более высокие значения температуры, чем фактически наблюдалось.

Прогностические значения от 10 октября (рисунок 2.6) согласуются с фактическими данными на протяжении почти половины срока с 10 по 20 октября (при этом реальные значения наблюдались выше, чем прогнозировалось ансамблем). Затем отмечается значительный разброс значений ансамбля и несовпадение между средним модельным значением и фактическими данными.

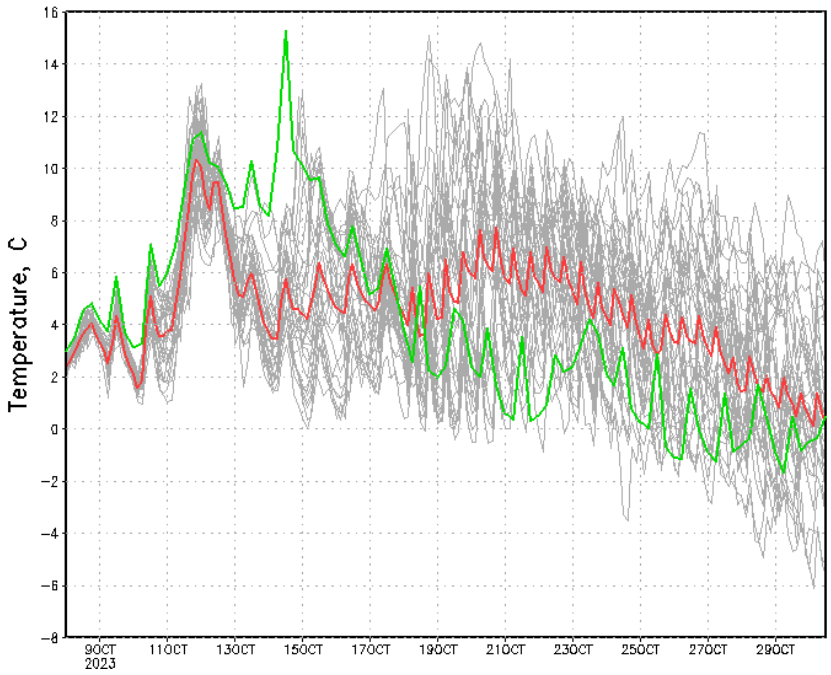

Рисунок 2.5 – График долгосрочного ансамблевого прогноза с 8 октября по 12 ноября 2023 года

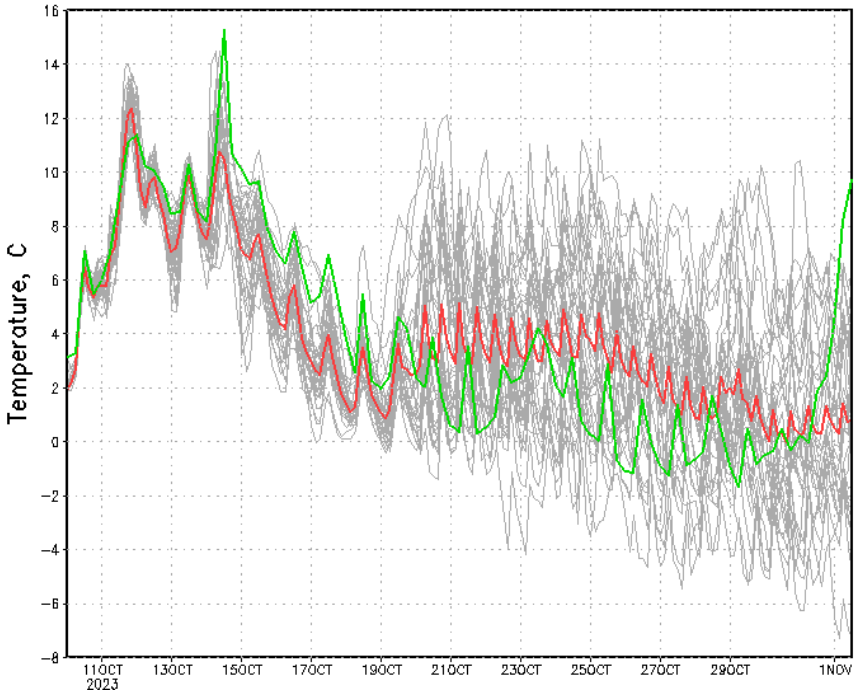

Рисунок 2.6 – График долгосрочного ансамблевого прогноза с 10 октября по 14 ноября 2023 года

Прогностические значения температуры воздуха при прогнозе от 16 октября (рисунок 2.7) близки к фактическим примерно до 24 октября, при котором фактические температуры были несколько выше модельной. С 24 по 1 ноября модель предсказывала небольшое повышение температуры, в то время как фактическая температура воздуха, наоборот, понижалась. 1-2 ноября наблюдается резкое повышение температуры до 10°С с резким понижением до 0°С 3 ноября и последующим повышением до 6°С. При этом ход модельных значений совершенно не совпадает с фактическими данными.

Прогноз от 18 октября (рисунок 2.8) примечателен тем, что в период прогноза с 23 по 29 октября многие члены прогностического ансамбля показывают очень близкие значения к фактическим данным температуры.

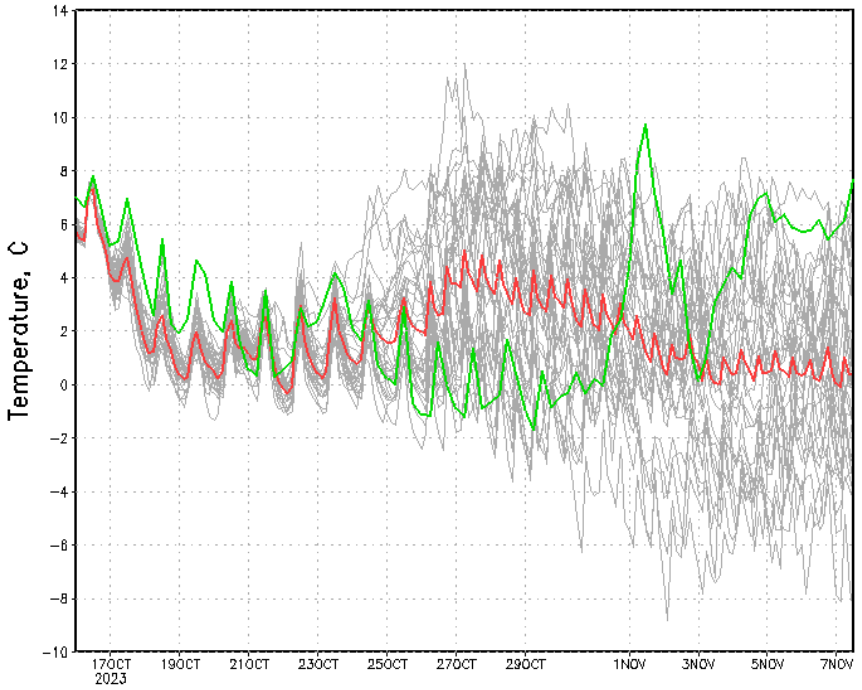

Рисунок 2.7 – График долгосрочного ансамблевого прогноза с 16 октября по 20 ноября 2023 года

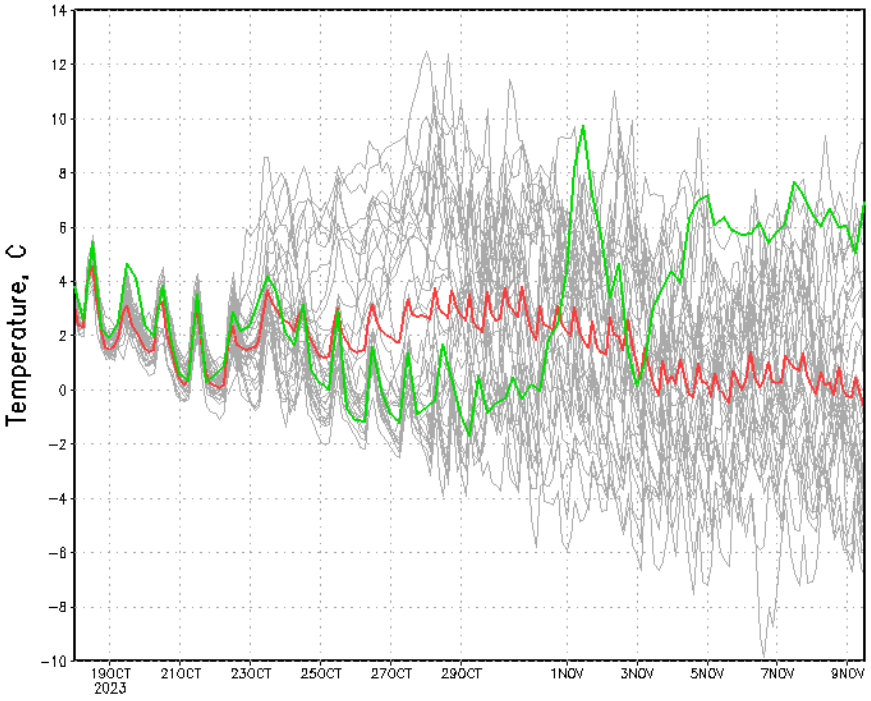

Рисунок 2.8 – График долгосрочного ансамблевого прогноза с 18 октября по 22 ноября 2023 года

По графику для прогноза от 21 октября (рисунок 2.9) ярко видно, как сбиваются прогноз модели по сравнению с фактическими. Пока фактические значения показывают скачок температуры до 10°C, модель дает спокойное повышение с последующим плавным понижением.

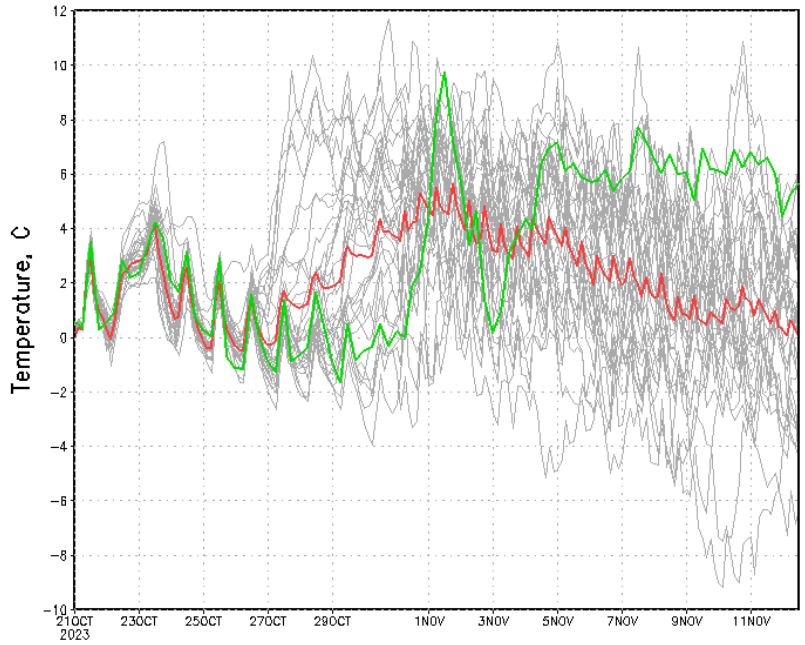

Рисунок 2.9 – График долгосрочного ансамблевого прогноза с 21 октября по 25 ноября 2023 года

Прогноз от 23 октября (рисунок 2.10) показывает сильный разброс членов ансамбля, особенно с 7 по 14 ноября, что понизило среднее модельное значение.

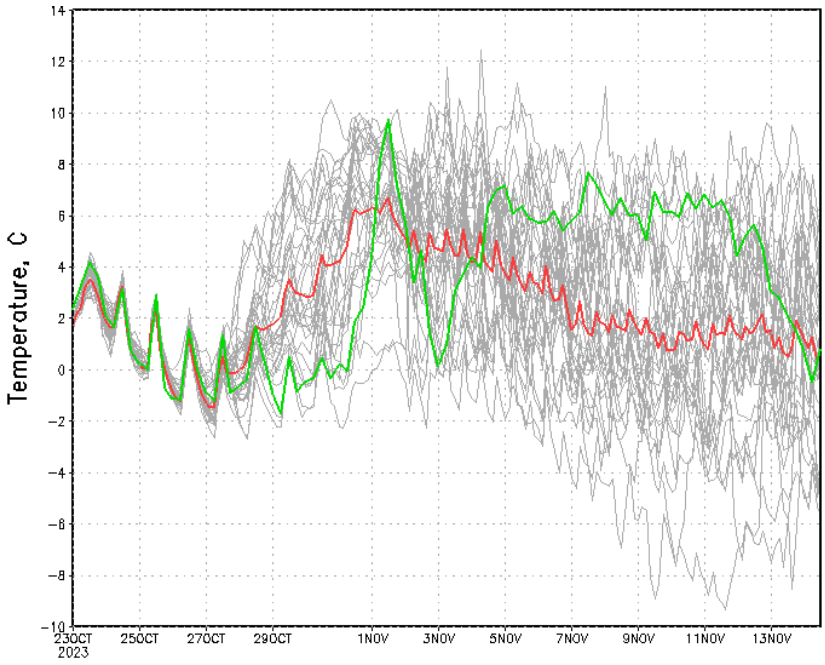

Рисунок 2.10 – График долгосрочного ансамблевого прогноза с 23 октября по 27 ноября 2023 года

По полученному анализу можно сделать вывод, что ансамблевый прогноз дает достаточно хороший прогноз на первые 5 – 8 суток. При этом модельное среднее значение немного ниже фактического. Затем прогноз членов ансамбля начинает расходится. При прогнозе с 13 по 20 сентября модель в основном занижает значения температуры, а в прогнозе за октябрь после значительно высокого значения фактической температуры 14 октября (15℃) и последующего её резкого понижения, модель показывала более высокие температуры, по сравнению с теми, что реально наблюдались.

2.2 Сравнение прогнозов членов ансамбля с фактическими значениями температуры

Далее была проведена оценка близости прогноза температуры каждого члена ансамбля к фактическому значению. Для этой цели были отрисованы графики, отражающие разницу каждого члена ансамбля от фактического значения. Каждому полученному значению был присвоен свой цвет на графике. Чем ближе прогноз температуры к фактическому значению, тем ближе его значение к нулю. Графики отрисованы за те же даты, что и в предыдущем разделе с целю рассмотрения типизированных прогнозов.

По графику с рисунка 2.11 видно, что значения членов ансамбля ближе всего к нулю с 13 по 20 сентября; наиболее заниженные значения отмечаются за период примерно с 21 сентября по 6 октября, а также занижение прогноза заметно с 11 по 18 октября. За период с 6 по 11 октября отмечается общее завышение значений.

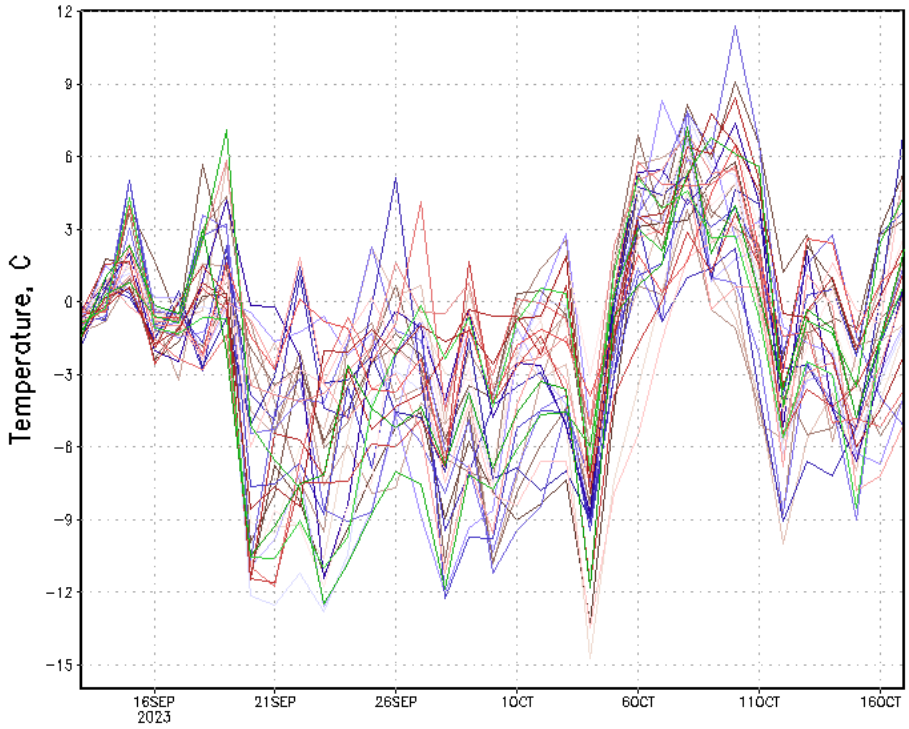

Рисунок 2.11 – График разности прогноза температуры отдельных членов ансамбля и фактического значения с 13 сентября по 18 октября 2023 года.

На графике рисунка 2.12 ближе всего к фактическим значениям температуры члены ансамбля были с 15 по 20 сентября с резким завышением значений примерно 18 сентября. Большую часть прогноза отмечалось занижение значений, только за период с 5 по 11 октября отмечается общее завышение. Также по графику можно проследить тенденцию того, как некоторые члены ансамбля дают прогноз в течение срока: некоторые чаще всего дают более близкий прогноз относительно других (например, красная, оранжевая кривые), а другие сильнее отклоняются от фактического как в положительную, так и в отрицательную сторону (светло- и темно-фиолетовые кривые).

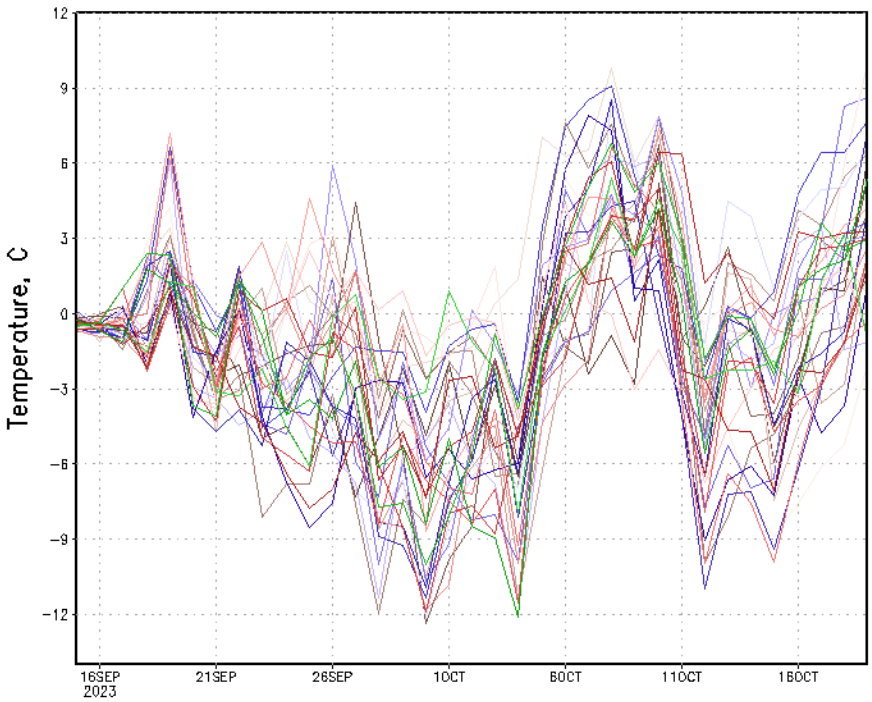

Рисунок 2.12 – График разности прогноза температуры отдельных членов ансамбля и фактического значения с 15 сентября по 20 октября 2023 года.

По графику с рисунка 2.13 видно, что все члены ансамбля дают более близкий прогноз в первой половине срока, с 20 сентября по примерно 3 октября. Далее большинство членов ансамбля резко занижают, а затем резко завышают свои значения прогноза. ближе к концу срока многие члены ансамбля оказываются близки к фактическим данным, хотя их значения слегка завышены. Также стоит отметить то, что как минимум 1-2 члена ансамбля оказываются близки к фактическим значениям в течение практически всего срока, но отклоняющихся членов ансамбля больше, и они перевешивают при вычислении среднего значения по ансамблю.

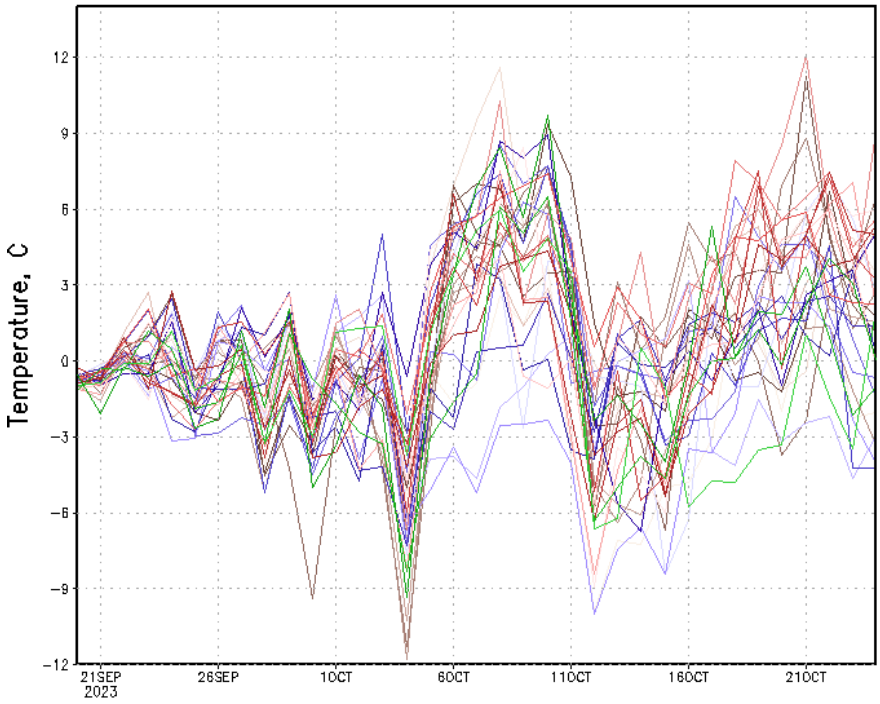

Рисунок 2.13 – График разности прогноза температуры отдельных членов ансамбля и фактического значения с 20 сентября по 25 октября 2023 года

По графику с рисунка 2.14 видно первые несколько дней прогноза данные ансамблей близки между собой и близки к фактическому значению. Далее большую часть срока отмечается завышение значений, за исключением периода с 11 по 16 октября. В период с 16 октября по 3 ноября отмечается сильный разброс членов ансамбля между собой.

По рисунку 2.15 видно, что члены ансамбля достаточно близки к фактическим данным в первые 3 суток. Затем наблюдается занижение значений в период с 11 по 16 октября и с 1 по 12 ноября. Завышение значений отмечается в период с 16 октября по 1 ноября. При этом стоит отметить хаотичность членов ансамбля в период завышения и общность занижений и занижений в середине октября и в начале ноября.

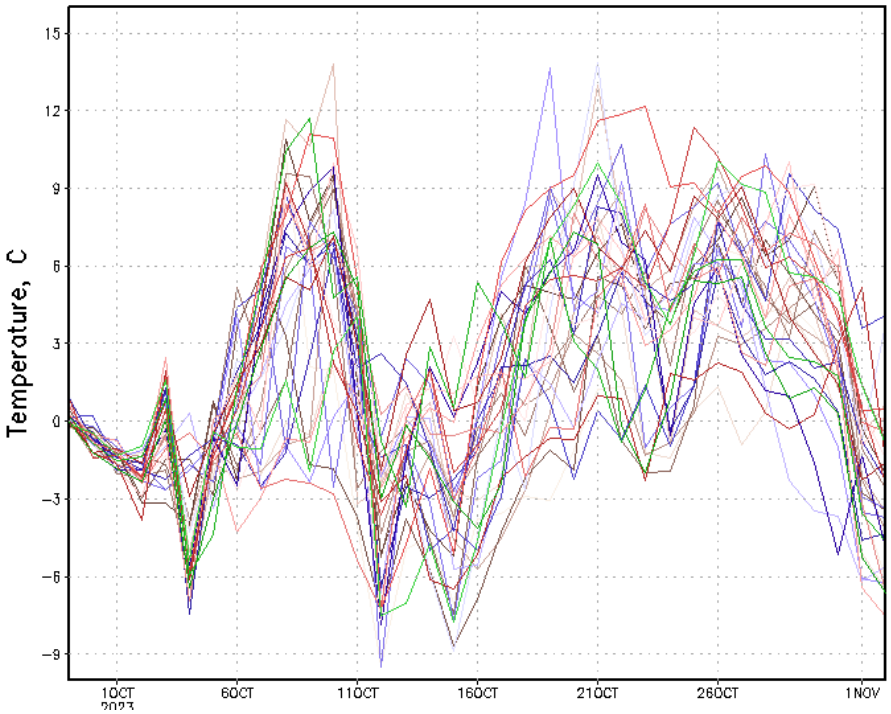

Рисунок 2.14 – График разности прогноза температуры отдельных членов ансамбля и фактического значения с 29 сентября по 3 ноября 2023 года

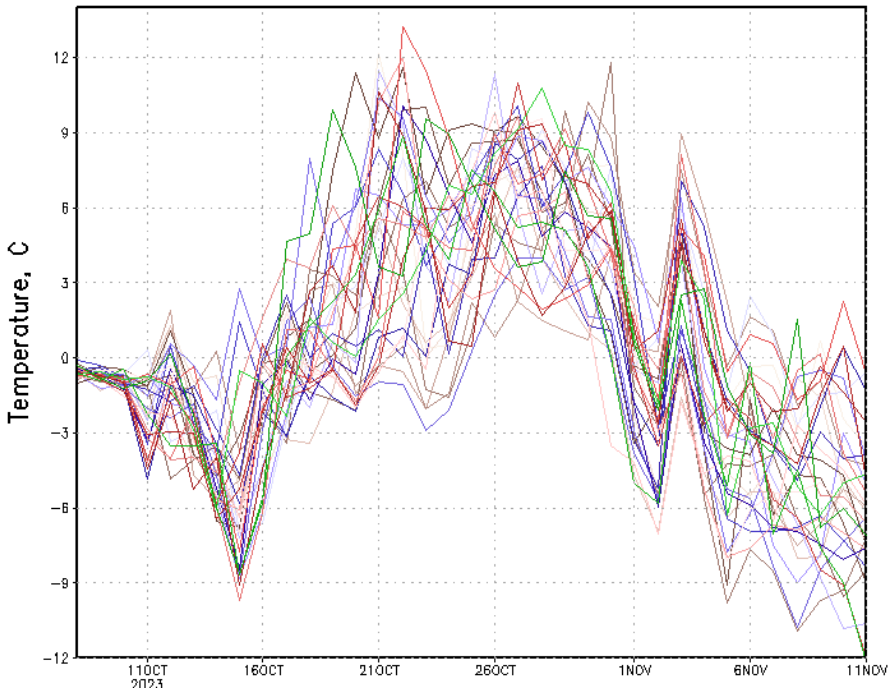

Рисунок 2.15 – График разности прогноза температуры отдельных членов ансамбля и фактического значения с 8 октября по 12 ноября 2023 года

По графику с рисунка 2.16 наблюдается типичная близость членов ансамбля у фактическим данным температуры, затем с 16 октября по 1 ноября отмечается завышение значений членов ансамбля, с 1 ноября и до конца срока– тенденция занижения значений. В момент резкого занижения значений в начале ноября прогноз членов ансамбля близок между собой. Также можно обратить внимание на то, что член ансамбля, окрашенный салатовым цветом, в среднем имеет наиболее близкий к фактическим значениям температуры прогноз, особенно в первой половине срока.

На графике рисунка 2.17 члены ансамбля достаточно блики между собой и к фактическим значениям в начале срока, примерно с 16 по 23 октября. Завышение значений отмечается в конце октября и в середине ноября, занижение – в первой половине ноября. На данном графике член ансамбля, окрашенный салатовым цветом, также достаточно близок к фактическим значениям температуры относительно других членов ансамбля.

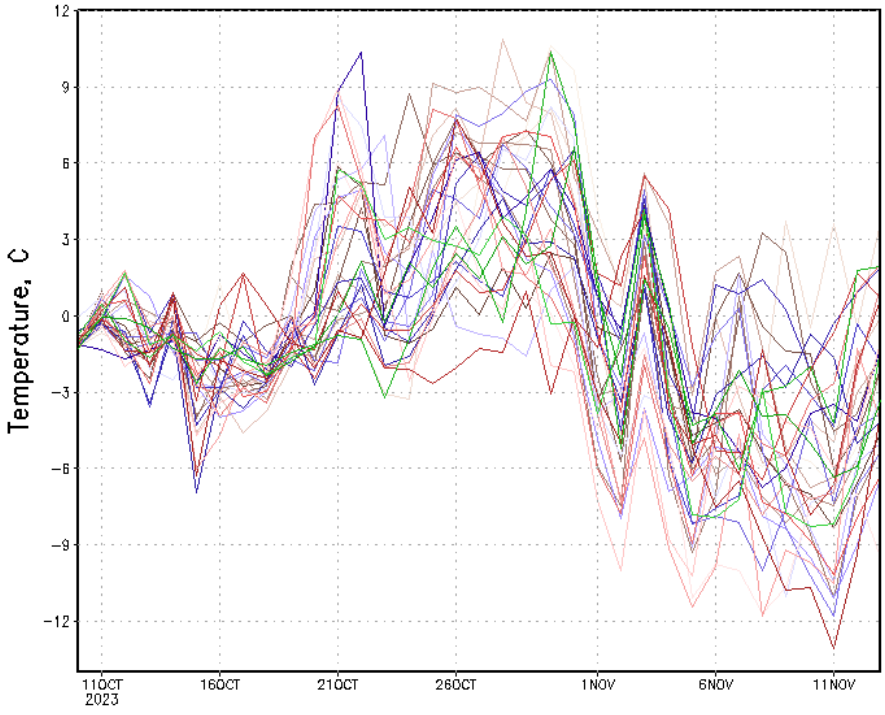

Рисунок 2.16 – График разности прогноза температуры отдельных членов ансамбля и фактического значения с 10 октября по 14 ноября 2023 года

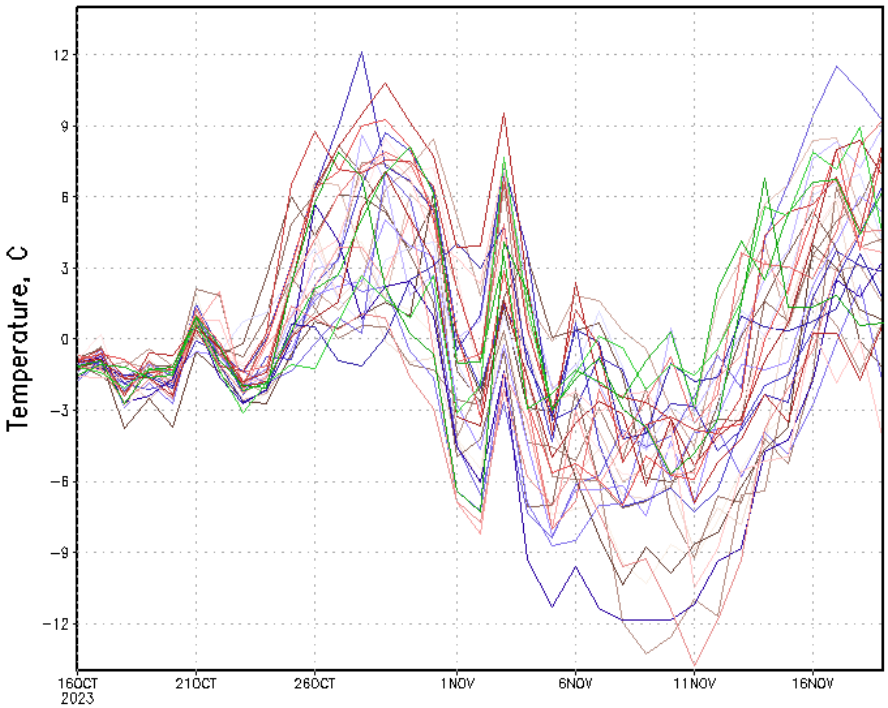

Рисунок 2.17 – График разности прогноза температуры отдельных членов ансамбля и фактического значения с 16 октября по 20 ноября 2023 года

На рисунке 2.18 отмечаются завышение данных в конце октября и примерно во второй половине ноября, занижения в начале ноября. Отдельные члены ансамбля в ноябре дают достаточно низкие значения, выбиваясь из общей тенденции ансамбля.

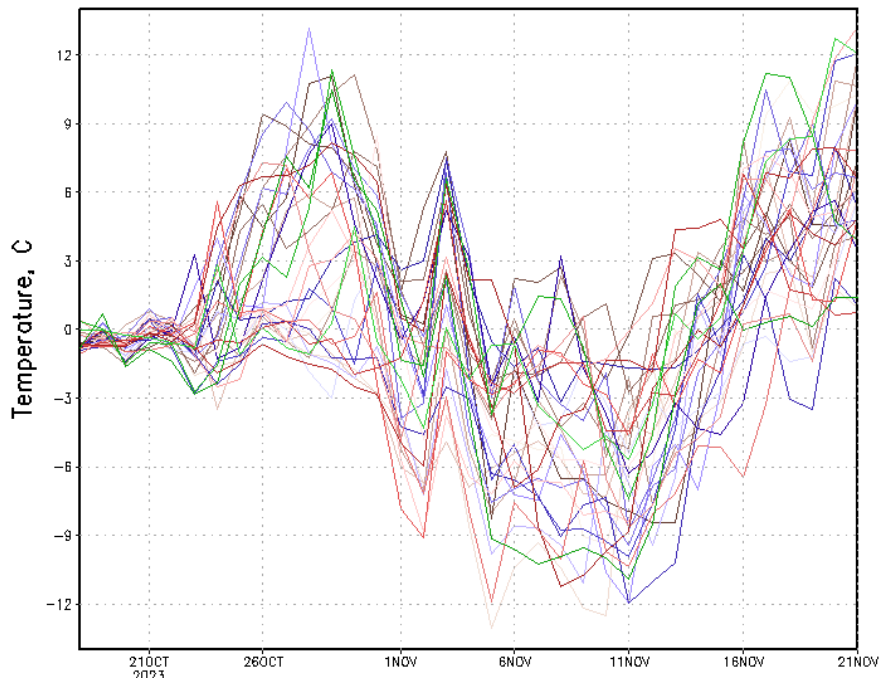

Рисунок 2.18 – График разности прогноза температуры отдельных членов ансамбля и фактического значения с 18 октября по 22 ноября 2023 года

На графике с рисунка 2.19 наблюдается та же тенденция завышения значений в конце октября, начале и во второй половине ноября и занижением значений в первой половине ноября, но стоит отметить то, что некоторые члены ансамбля во второй половине ноября (красная и оранжевые кривые) сильно выбиваются из общей тенденции ансамбля и сильно занижают значения. При этом на рисунке 2.20 примерно в этот же период времени выбиваются уже красная и фиолетовая кривые, оранжевые наоборот – дают более высокие значения. Возможно, на это повлияло смещение срока прогноза, или прогноз данных членов ансамбля в конце срока становится близок к случайному.

На графике рисунка 2.20 тенденция к завышению значений прогноза в конце октября – начале ноября и во второй половине ноября сохраняется.

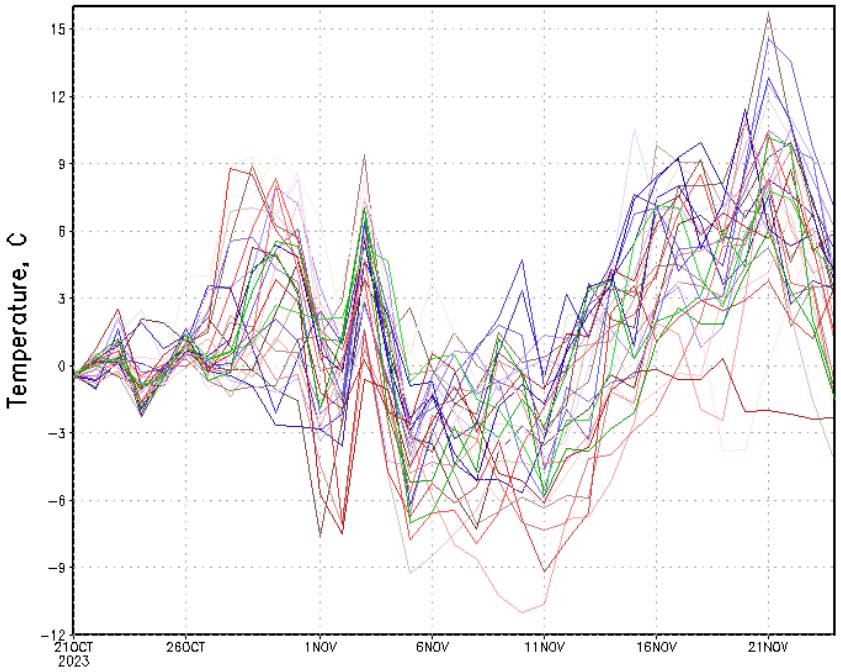

Рисунок 2.19 – График разности прогноза температуры отдельных членов ансамбля и фактического значения с 21 октября по 25 ноября 2023 года

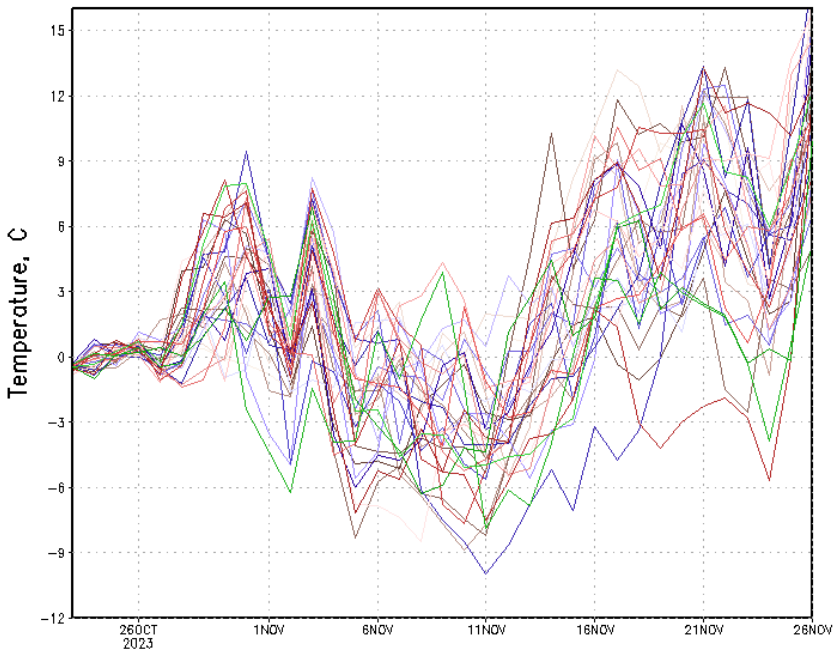

Рисунок 2.20 – График разности прогноза температуры отдельных членов ансамбля и фактического значения с 23 октября по 27 ноября 2023 года

По полученным графикам можно сделать вывод о том, что в начале первые 3-5 суток прогноз температуры большинства членов ансамбля достаточно близок к фактическим данным. Далее значения ансамблей начинают расходится, соблюдая общую тенденцию. Стоит отметить, что прогноз некоторых членов ансамбля в отдельные сроки достаточно близок к фактическим значениям. При этом в другие сроки они могут сильно выбиваться из общей тенденции ансамбля. Например, фиолетовые кривые в первые несколько сроков давали достаточно близкие значения, а в последние сроки стали сильно выбиваться и давать заниженные значения.

Также члены ансамбля дают достаточно близкие к друг к другу завышения или понижения значений в определенные периоды времени (к примеру, в начале и конце октября, в начале ноября), которые сохраняются в течение других сроков и при приближении этих периодов к началу отсчета прогноза.

2.3 Анализ характеристик качества ансамблевого прогноза

Для каждого ансамблевого прогноза температуры, рассмотренных выше, были рассчитаны максимальные и минимальные значения, среднее по ансамблю, процентиль (рассчитан при 75%) и стандартное отклонение.

На графиках синяя линия – максимальные значения, красная – минимальные значения, розовая – среднее по ансамблю, фиолетовая – процентиль. Стандартные отклонения вынесены на отдельные графики серой линией.

По графику с рисунка 2.21 самые высокие максимальные значения отмечаются в первые дни срока (примерно до 23℃) и примерно в 20-х числах сентября (до 21℃), самые низкие минимальные значения – в начале октября (примерно -2 ℃). Среднее по ансамблю располагаются пределах примерно от 5 до 23 ℃. Процентиль примерно от 8 до 23 ℃. Наибольшие значения данных характеристик отмечаются с 13 по 15 сентября, наименьшие – с 3 по 5 октября.

По графику с рисунка 2.22 минимальное стандартное отклонение отмечается в самом начале прогноза и составляет около 0,5, максимальное примерно 20 сентября - чуть выше 4. После первой недели срока стандартное отклонение практически не опускалось ниже 2.

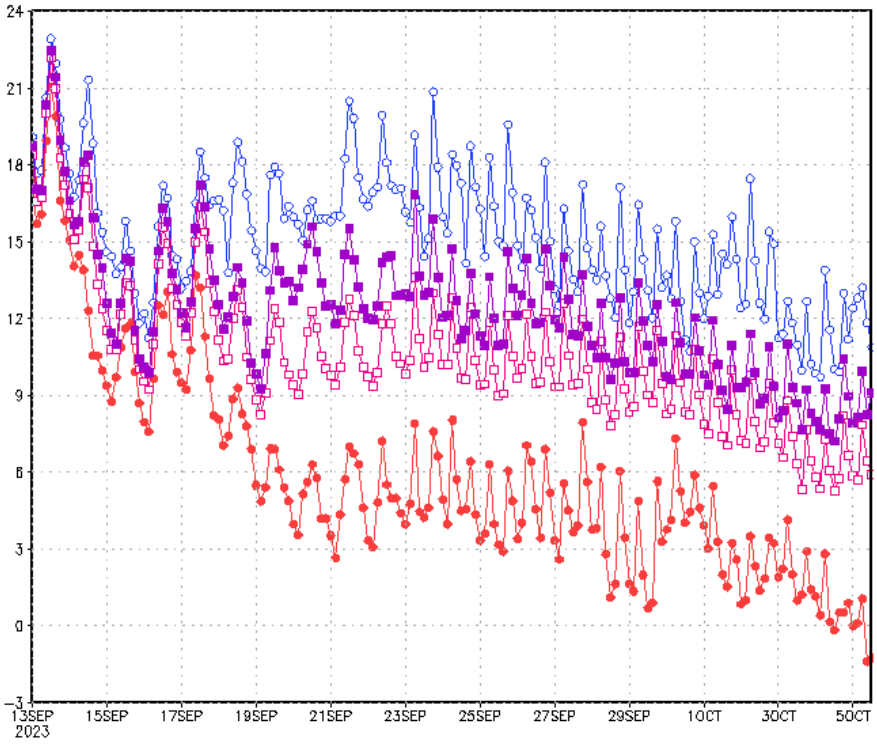

Рисунок 2.21 – График основных характеристик ансамблевого прогноза температур с 13 сентября 2023 года.

Рисунок 2.22 – График стандартного отклонения с 13 сентября 2023 года.

По графику с рисунка 2.23 самые высокие максимальные значения наблюдаются в основном в третьей декаде сентября (примерно до 24 °C), самые минимальные – в начале октября (около -1°C). Средние по ансамблю находятся примерно в пределах от 4 до 18 °C, процентиль – примерно от 6 до 22 °C. При этом наибольшие значения характеристик примерно с 21 по 23 сентября, наименьшие – примерно с 5 по 7 октября.

По графику стандартного отклонения (рисунок 2.24) минимальные значения отмечаются в начале срока, приблизительно 0,1-0,2, и низкие значения сохраняются в течение первых двух дней; максимальное значение достигает примерно 3,6 24-25 сентября. С 23 сентября стандартное отклонение отмечается в пределах от 2 до 3,5, в основном около 3.

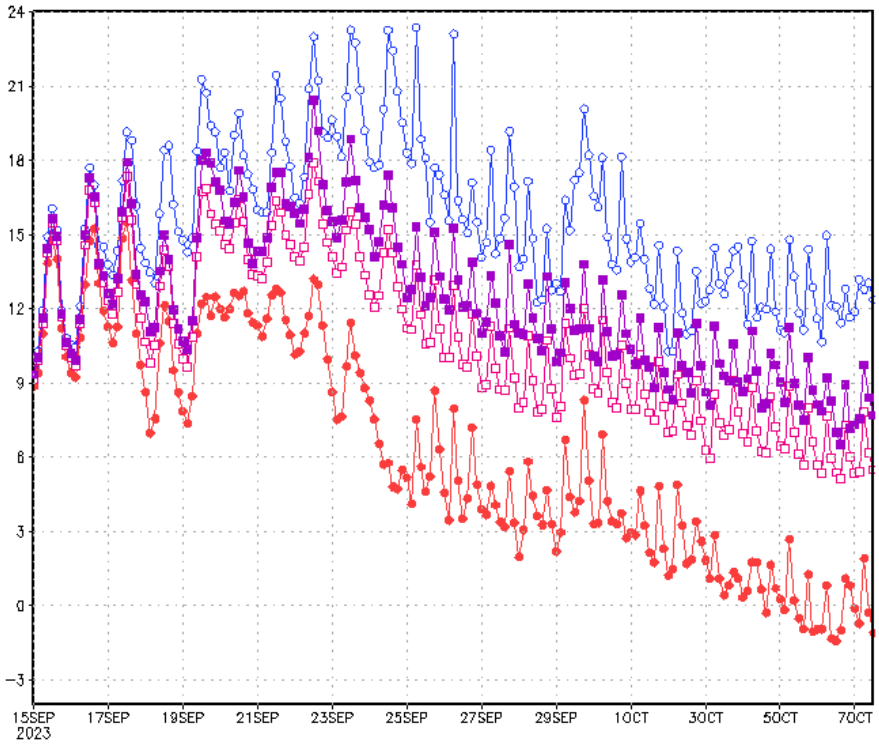

Рисунок 2.23 – График основных характеристик ансамблевого прогноза с 15 сентября 2023 года.

Рисунок 2.24 – График стандартного отклонения с 15 сентября 2023 года.

По графику с рисунка 2.25 максимальные значения выше в первой половине срока (до 24℃), минимальные ниже всего - ближе к концу срока (ниже -3 ℃). Среднее находится в пределах примерно от 3 до 22 ℃, процентиль – от 6 до 22 ℃. Наибольшие значения характеристик отмечаются в районе 23 сентября, наименьшие – после 11 октября. Видно понижение всех кривых в период с 24 по 27 сентября.

По графику стандартного отклонения (рисунок 2.26) заметно постепенное повышение значений в течение срока. Минимальное отмечается в начале прогноза (0,3), максимальное – ближе к концу (почти 3,5).

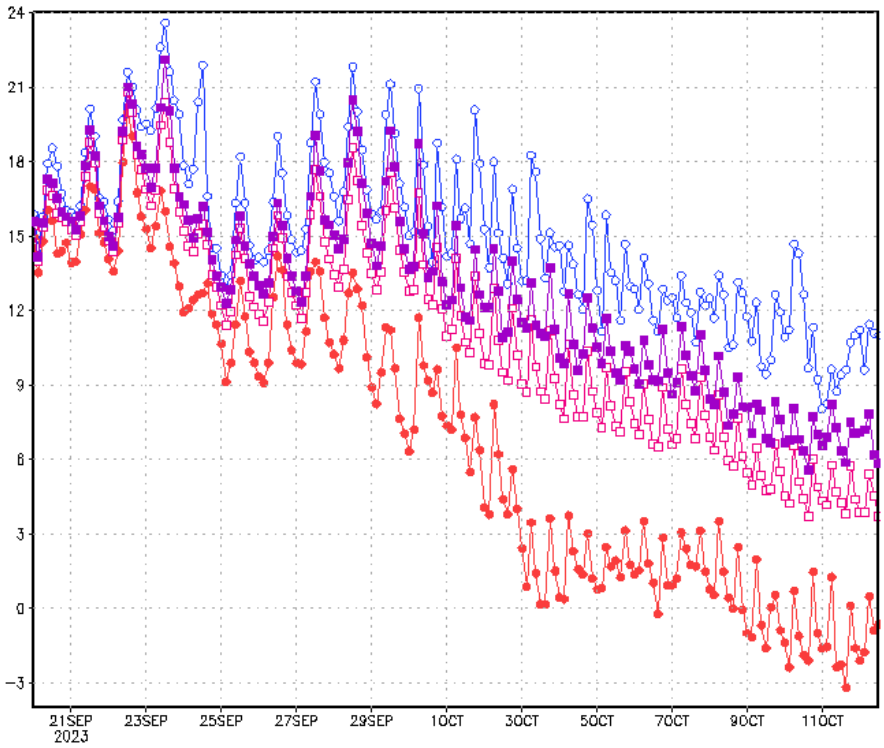

Рисунок 2.25 – График основных характеристик ансамблевого прогноза температуры с 20 сентября 2023 года

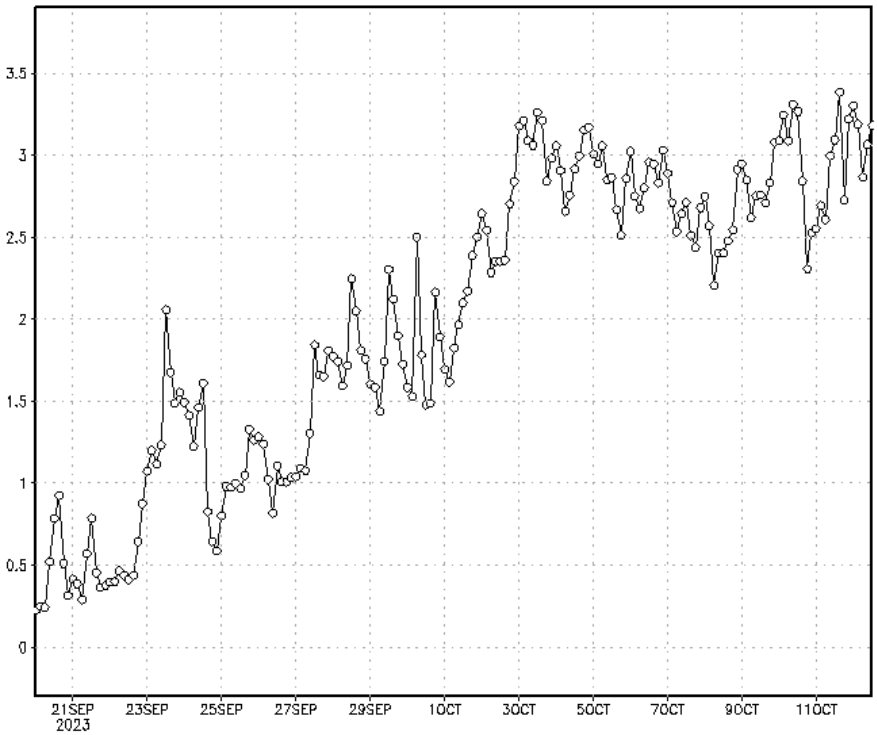

Рисунок 2.26 – График стандартного отклонения с 20 сентября 2023 года.

На графике рисунка 2.27 наиболее высокие максимальные значения отмечаются в начале срока (почти 21 °C) и примерно с 8 по 10 октября (около 20 °C); наиболее минимальные значения – в 20-х числах октября (примерно -5°C). Средние значения находятся в пределах примерно от 2 до 20 °C. Процентиль изменялся в пределах примерно от 5 до 20 °C. Последние две характеристики имеют наибольшие значения в начале октября, наименьшие – примерно с 19 по 21 октября.

На графике стандартного отклонения (рисунок 2.28) минимальные значения составляют 0,4 в начале срока, максимальные – чуть ниже 4,5 примерно 8-9 октября. Во второй половине срока значения не опускались ниже 2.

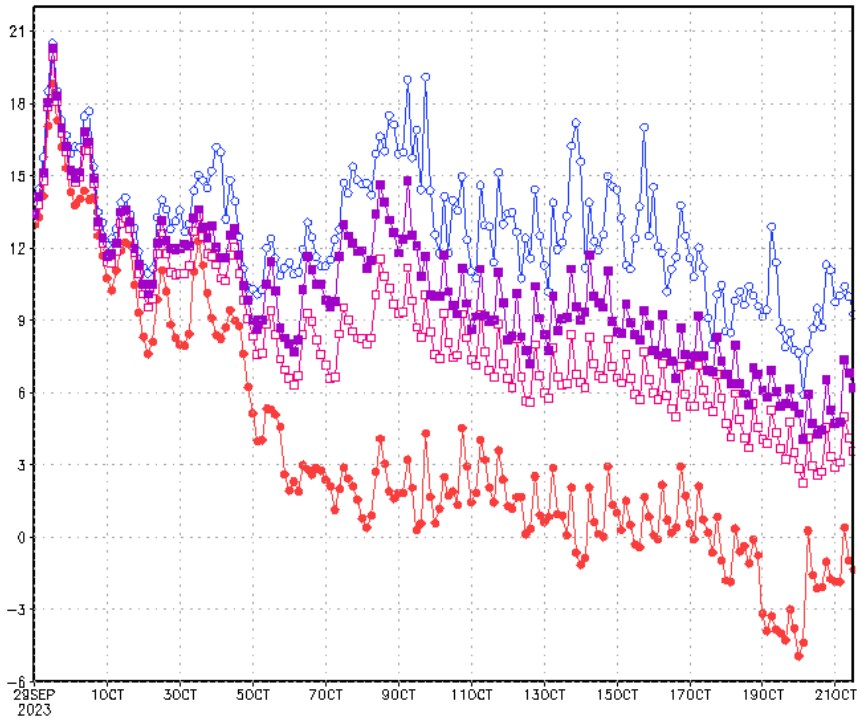

Рисунок 2.27 – График основных характеристик ансамблевого прогноза температуры с 29 сентября 2023 года

Рисунок 2.28 – График стандартного отклонения с 29 сентября 2023 года.

На графике рисунка 2.29 самые максимальные значения отмечаются в период примерно с 18 по 21 октября (около 15 ℃), фактически в середине срока, самые минимальные – в конце октября (-7 ℃). Средние значения определяются в пределах от 0 до примерно 11 ℃, процентиль – от 2 до 12 ℃. Наибольшие значения характеристик отмечаются примерно с 11 по 13 октября, наименьшие – в конце октября. Стоит отметить резкое повышение всех значений в период с 11 по 13 октября.

На графике стандартного отклонения (рисунок 2.30) минимальные значения составляют приблизительно 0,3 в начале срока, максимальные – около 4 примерно 20 октября. Во второй половине срока значения не опускались ниже 2. Можно отметить постепенное повышение значений в течение срока с отдельными повышениями.

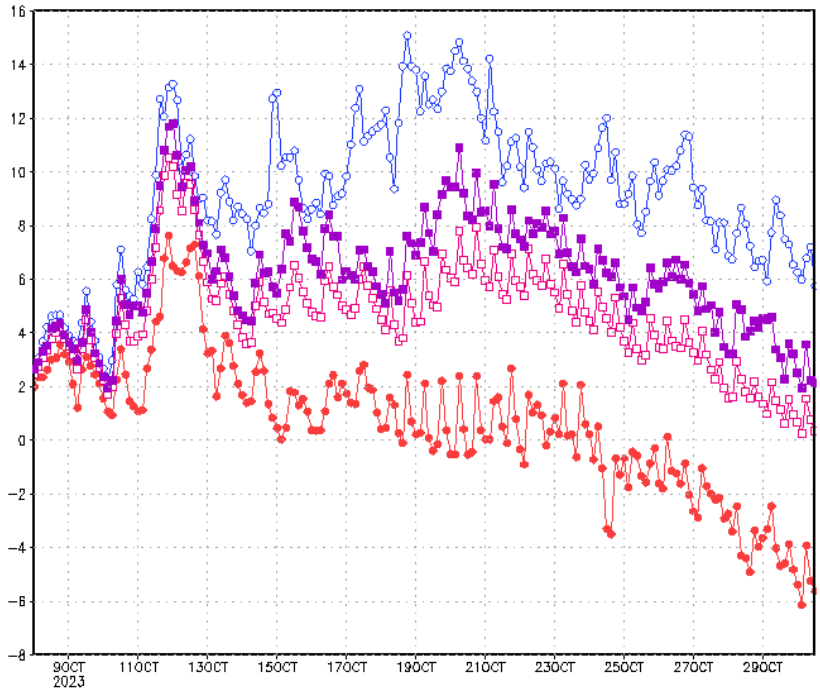

Рисунок 2.29 – График основных характеристик ансамблевого прогноза температуры с 8 октября 2023 года

Рисунок 2.30 – График стандартного отклонения с 8 октября 2023 года.

На графике рисунка 2.31 самые высокие максимальные значения отмечаются в период примерно с 11 по 15 октября (примерно 15 ℃), самые минимальные значения – в начале ноября (около -7 ℃). Средние значения определяются в пределах от 0 до 13 ℃, процентиль – от 1 до 13 ℃. Наибольшие значения данных характеристик наблюдаются в период с 11 по 13 октября, наименьшие – примерно с 17 по 19 октября. Отмечается понижение максимальных, средних значений и перцентиля в период с 15 по 19 октября.

На графике стандартного отклонения (рисунок 2.32) заметно увеличение значений в течение срока. Максимальное составляет примерно 3,6-3,7 30 – 31 октября. В общем во второй половине графика видно, что значения в среднем варьируются от 2,5 до 3,5, в среднем около 3. Минимальное в начале около 0,3.

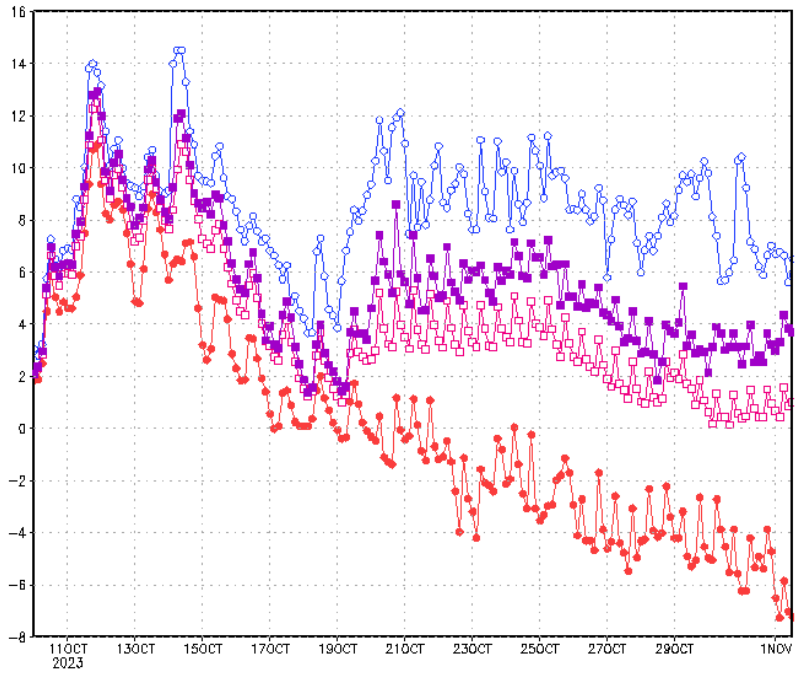

Рисунок 2.31 – График основных характеристик ансамблевого прогноза температуры с 10 октября 2023 года

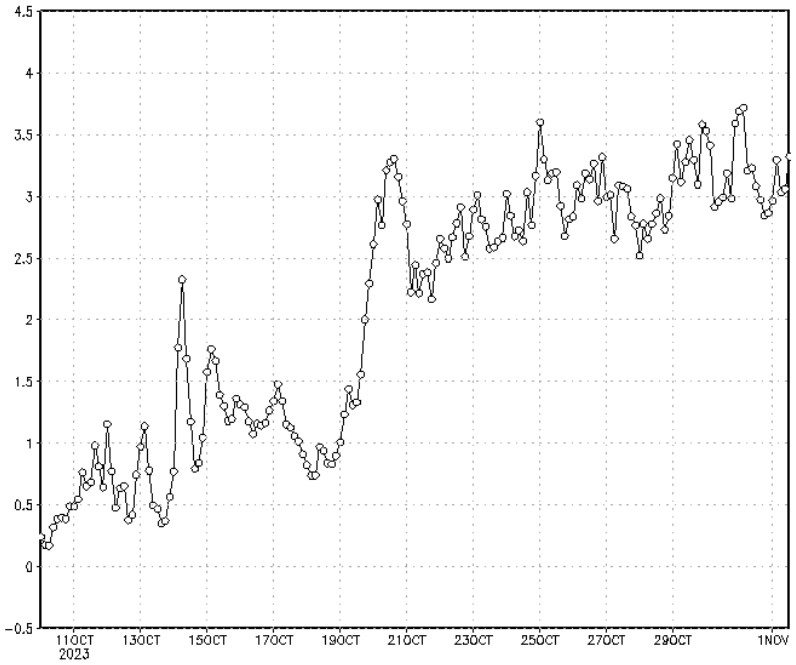

Рисунок 2.32 – График стандартного отклонения с 10 октября 2023 года.

График с рисунка 2.33 показывает самые высокие максимальные значения приблизительно с 26 по 28 октября (12 ℃), самые низкие минимальные значения – в начале ноября (примерно до -9 ℃). Средние значения, как и процентиль, располагаются в пределах от 0 до 8 ℃. Наиболее высокие значения этих характеристик отмечаются примерно с 27 по 29 октября, наименьшие – примерно с 21 по 23 октября Стоит отметить то, что на предыдущих графиках все кривые находились достаточно близко друг к другу в течение 2-4 суток, а на данном графике примерно с 16 по 24 октября, то есть чуть более недели.

Стандартное отклонение (рисунок 2.34) возрастает в течение срока. Минимальное – примерно 0,2, максимальное – около 4 в районе 4 ноября. В первую неделю значения стандартного отклонения не превышают 1 со средним значением примерно 0,6; во второй половине графика __ значения варьируются от 2,5 до 4, в среднем около 3.

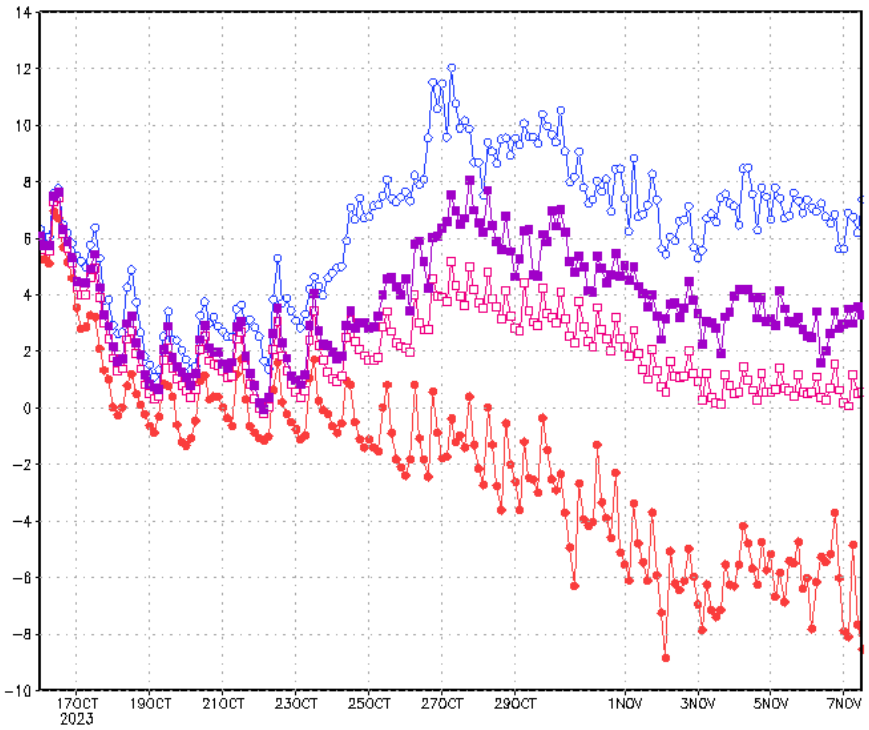

Рисунок 2.33 – График основных характеристик ансамблевого прогноза температуры с 16 октября 2023 года

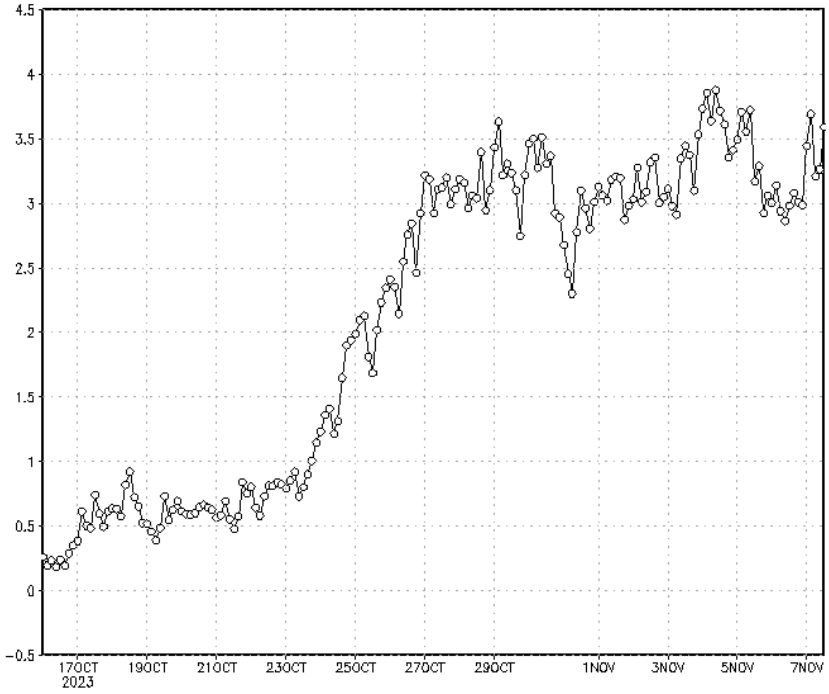

Рисунок 2.34 – График стандартного отклонения с 16 октября 2023 года.

На графике с рисунка 2.35 самые высокие максимальные значения отмечаются в период с 27 по 29 октября (чуть выше 12 °C), самые низкие минимальные значения – 6-7 ноября (до -10 °C). Среднее находится в пределах

от 0 до 6 ℃, процентиль – от 0 до 8 ℃ Самые высокие значения данных показателей наблюдаются с 27 октября по 3 ноября, самые низкие – примерно 21-23 октября.

Стандартные отклонения с рисунка 2.36 в начале варьировались вокруг 0,5, а затем стали увеличиваться. Начиная с 27 октября, значения стали варьироваться от примерно 2,5 до 4,5. Максимум наблюдается 28 октября.

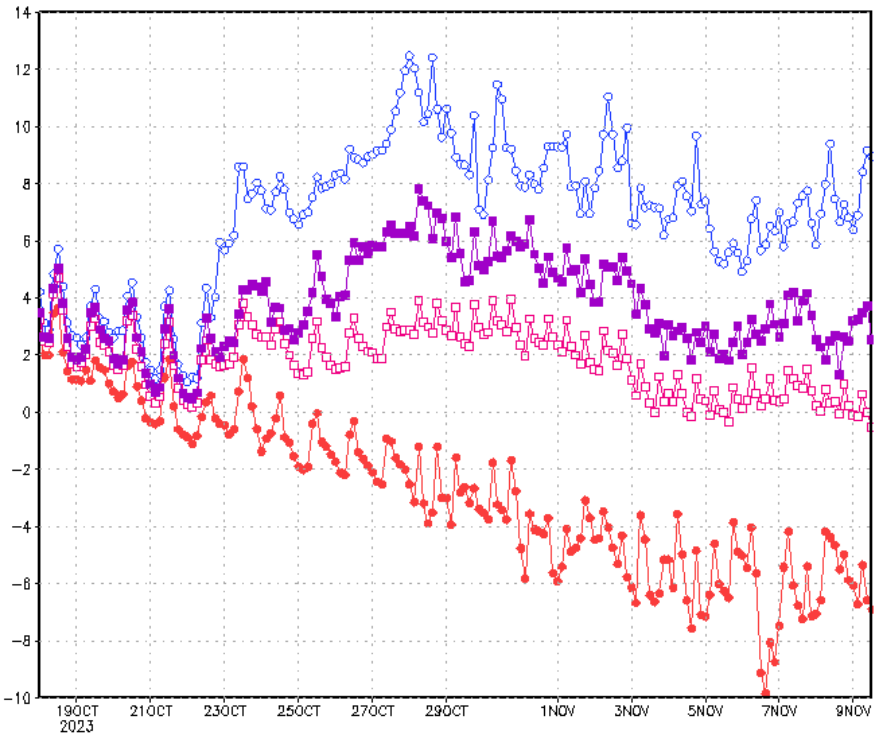

Рисунок 2.35 – График основных характеристик ансамблевого прогноза температуры с 18 октября 2023 года

Рисунок 2.36 – График стандартного отклонения с 18 октября 2023 года.

На графике рисунка 2.37 самые высокие максимальные значения наблюдаются в конце октября (примерно 12 ℃), самые низкие минимальные значения с 9 по 11 ноября (примерно -9 ℃). Средние значения отмечаются в пределах от 0 до 6 ℃, процентиль – от 0 до 8℃. Наиболее высокие значения последних двух показателей – в начале ноября, наиболее низкие – примерно с 25 по 27 октября.

Стандартное отклонение возрастает в течение срока. Первую неделю значения были около 0,5 (с единственным повышением 24 октября до примерно 1,4). Далее значения варьировались от 2 до 4 (с максимумом примерно 10-11 ноября), со средним значением около 3.

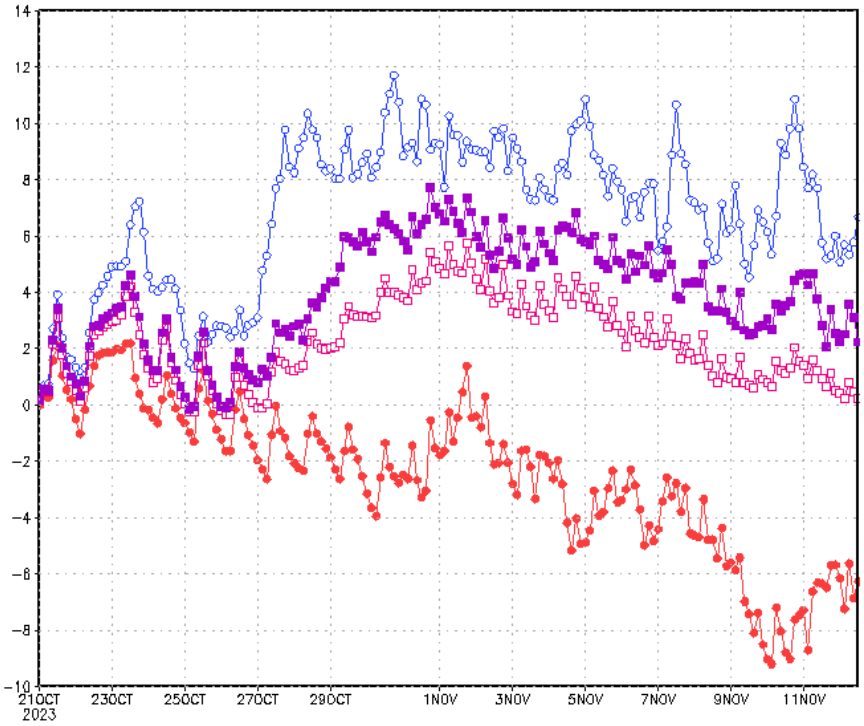

Рисунок 2.37 – График основных характеристик ансамблевого прогноза температуры с 21 октября 2023 года

Рисунок 2.38 – График стандартного отклонения с 21 октября 2023 года.

На графике с рисунка 2.39 самые высокие максимальные значения наблюдаются в период с 3 по 5 ноября (чуть выше 12 °C), самые низкие

минимальные – примерно с 9 по 12 ноября (около -9 °С). Средние значения отмечаются в пределах примерно от -1 до 7 °С, процентиль – от -1 до примерно 9 °С. наибольшие значения этих характеристик наблюдаются в конце октября-начале ноября, наименьшие - в районе 25-27 октября.

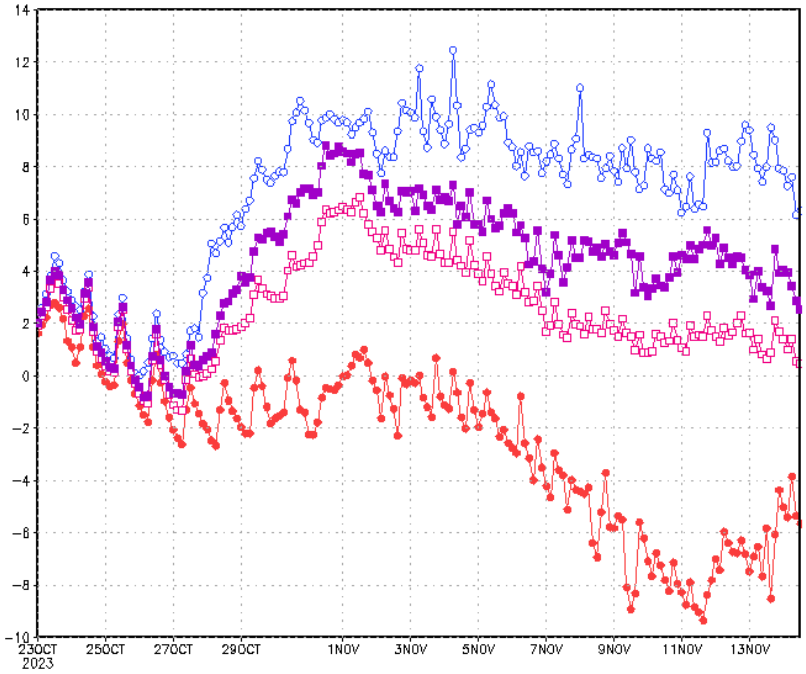

Рисунок 2.39 – График основных характеристик ансамблевого прогноза температуры с 23 октября 2023 года

Стандартные отклонения (рисунок 2.40) увеличиваются в течение срока. Первую неделю они минимальны и составляют около 0,5, затем достигают максимума 10 и 12 ноября – чуть выше 4.

Рисунок 2.40 – График стандартного отклонения с 23 октября 2023 года.

По данным графикам можно сделать вывод о том, что в начале срока прогноза на большинстве графиков кривые всех показателей идут достаточно близко друг другу на протяжении от 2-3 до 7-8 дней, что говорит о низком разбросе значений членов ансамбля, затем кривые начинают расходится и в итоге амплитуда между максимальными и минимальными значениями может достигать 20°С, особенно ближе к концу срока.

Стандартные отклонения в основном увеличиваются в течение срока прогноза. Примерно первые 4-7 дней значения составляют примерно 0,5, затем с 3 недели варьируются между 2,5 – 4. В половине случаев максимальные значения отмечались на второй неделе прогноза (графики с рисунки 2.22, 2.24, 2.28, 2.30, 2.36).

Заключение

В данной работе было проведено исследование качества долгосрочного ансамблевого прогноза на основе данных системы GEFS для осеннего периода 2023 года в Санкт-Петербурге.

На основе данных ансамблевого прогноза были построены:

графики долгосрочного ансамблевого прогноза температуры воздуха на высоте 2 м на 35 суток в Санкт-Петербурге за период начала прогноза с 13 сентября по 26 ноября 2023 года;

графики, отражающие разницу каждого члена ансамбля от фактического значения с целью оценки близости прогноза температуры воздуха каждого члена ансамбля к фактическому значению;

графики основных характеристик долгосрочного ансамблевого прогноза, а именно максимальные и минимальные значения членов ансамбля, среднее значение, процентиль (при 75%) и среднеквадратическое отклонение.

На основе построенных графиков был сделан вывод, что рассматриваемая модель GFS дает достаточно хороший прогноз температуры воздуха на высоте 2 м на первые 5 – 8 суток, затем среднее по ансамблю начинает расходится с фактическими данными: с увеличением срока прогноза модельное среднее уменьшает амплитуду значений и в основном имеет тенденцию к занижению температуры воздуха; разница между максимальными и минимальными значениями членов ансамбля может достигать 20°C; Выбрать член ансамбля, заслуживающий большего доверия, нельзя, так как все члены ансамбля равновероятны и генерируются случайным образом.

Список использованных источников

1. Савичев А.И.: Синоптические методы прогноза погоды : учебное пособие /А.И. Савичев – Л. Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ) :, 1982. – 54 с.;

2. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО – Всемирная метеорологическая организация:, 2019 – 165с.;

3. Угрюмов А.И.: Долгосрочные метеорологические прогнозы. Учебное пособие. - СПб, изд. РГГМУ, 2006. - 84 с.

4. Цепелев В. Ю. Анискина О.Г. Ансамблевый прогноз: составление, использование, интерпретация : учебное пособие / В.Ю. Цепелев, О.Г. Анискина. – СПб. : Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. – 110 с.;

5. Кучмент, Л.С. Методические основы ансамблевых гидрологических прогнозов / Л.С. Кучмент // Водное хозяйство России. – 2014 - №3. – С.16-29.

6. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО / Всемирная метеорологическая организация – М., 2019.

7. Thomas M. Hamill, Josip Juras. Brier Skill Scores, ROCs, and Economic Value Diagrams Can Report False Skill // Monthly Weather Review - 2005.

8. Brier Score: Definition, Examples - Statistics How To : официальный сайт - URL: https://www.statisticshowto.com (дата обращения: 28.04.2024) - Текст : электронный.

9. Evidently AI - Open-Source ML Monitoring and Observability : официальный сайт - URL: https://www.evidentlyai.com/ (дата обращения: 28.04.2024) - Текст : электронный.

10. Tilmann Gneiting, Peter Vogel, Eva-Maria Walz. Receiver Operating Characteristic (ROC) Curves // TIGGE{S2S Workshop, ECMWF, Reading. – 2019. – URL: https://www.ecmwf.int ((дата обращения: 10.04.2024)

11. arXiv.org e-Print archive : официальный сайт - URL: https://arxiv.org/ (дата обращения: 28.04.2024) - Текст : электронный.

12. Global Ensemble Forecast System (GEFS) | National Centers for Environmental Information (NCEI) : официальный сайт - URL: https://www.ncei.noaa.gov/ (дата обращения: 2.04.2024) - Текст : электронный.;

13. Global Forecast System – Wikipedia : официальный сайт - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Forecast_System (дата обращения: 2.04.2024) - Текст : электронный.

14. Fanglin Yang, Geoffrey Manikin. GFS V16.0.0 –Upgrades for Q2FY2021 / Fanglin Yang, Geoffrey Manikin // Briefing to EMC CCB. – 2020. – URL: https://www.ncei.noaa.gov/ (дата обращения: 10.04.2024)

Приложения

Приложение 1

1:0:d=2024041400:HGT:10 mb:anl:ens mean

2:251077:d=2024041400:TMP:10 mb:anl:ens mean

3:377567:d=2024041400:RH:10 mb:anl:ens mean

4:448605:d=2024041400:UGRD:10 mb:anl:ens mean

5:703141:d=2024041400:VGRD:10 mb:anl:ens mean

6:948584:d=2024041400:HGT:50 mb:anl:ens mean

7:1182981:d=2024041400:TMP:50 mb:anl:ens mean

8:1311457:d=2024041400:RH:50 mb:anl:ens mean

9:1402881:d=2024041400:UGRD:50 mb:anl:ens mean

10:1662594:d=2024041400:VGRD:50 mb:anl:ens mean

11:1915292:d=2024041400:HGT:100 mb:anl:ens mean

12:2148884:d=2024041400:TMP:100 mb:anl:ens mean

13:2274395:d=2024041400:RH:100 mb:anl:ens mean

14:2423391:d=2024041400:UGRD:100 mb:anl:ens mean

15:2689804:d=2024041400:VGRD:100 mb:anl:ens mean

16:2952731:d=2024041400:HGT:200 mb:anl:ens mean

17:3182281:d=2024041400:TMP:200 mb:anl:ens mean

18:3309174:d=2024041400:RH:200 mb:anl:ens mean

19:3525754:d=2024041400:UGRD:200 mb:anl:ens mean

20:3696904:d=2024041400:VGRD:200 mb:anl:ens mean

21:3868468:d=2024041400:HGT:250 mb:anl:ens mean

22:4095051:d=2024041400:TMP:250 mb:anl:ens mean

23:4215251:d=2024041400:RH:250 mb:anl:ens mean

24:4455960:d=2024041400:UGRD:250 mb:anl:ens mean

25:4628991:d=2024041400:VGRD:250 mb:anl:ens mean

26:4803523:d=2024041400:HGT:300 mb:anl:ens mean

27:5027832:d=2024041400:UGRD:300 mb:anl:ens mean

28:5204857:d=2024041400:VGRD:300 mb:anl:ens mean

29:5385418:d=2024041400:UGRD:400 mb:anl:ens mean

30:5556055:d=2024041400:VGRD:400 mb:anl:ens mean

31:5732957:d=2024041400:HGT:500 mb:anl:ens mean

32:5981639:d=2024041400:TMP:500 mb:anl:ens mean

33:6101632:d=2024041400:RH:500 mb:anl:ens mean

34:6347786:d=2024041400:UGRD:500 mb:anl:ens mean

35:6618215:d=2024041400:VGRD:500 mb:anl:ens mean

36:6890387:d=2024041400:HGT:700 mb:anl:ens mean

37:7148425:d=2024041400:TMP:700 mb:anl:ens mean

38:7275113:d=2024041400:RH:700 mb:anl:ens mean

39:7518651:d=2024041400:UGRD:700 mb:anl:ens mean

40:7782845:d=2024041400:VGRD:700 mb:anl:ens mean

41:8046931:d=2024041400:HGT:850 mb:anl:ens mean

42:8314800:d=2024041400:TMP:850 mb:anl:ens mean

43:8457735:d=2024041400:RH:850 mb:anl:ens mean

44:8709271:d=2024041400:VVEL:850 mb:anl:ens mean

45:9029064:d=2024041400:UGRD:850 mb:anl:ens mean

46:9297801:d=2024041400:VGRD:850 mb:anl:ens mean

47:9567957:d=2024041400:HGT:925 mb:anl:ens mean

48:9846342:d=2024041400:TMP:925 mb:anl:ens mean

49:9988133:d=2024041400:RH:925 mb:anl:ens mean

50:10230603:d=2024041400:UGRD:925 mb:anl:ens mean

51:10498874:d=2024041400:VGRD:925 mb:anl:ens mean

52:10767903:d=2024041400:TMP:1000 mb:anl:ens mean

53:10909826:d=2024041400:RH:1000 mb:anl:ens mean

54:11137555:d=2024041400:UGRD:1000 mb:anl:ens mean

55:11409011:d=2024041400:VGRD:1000 mb:anl:ens mean

56:11674870:d=2024041400:HGT:1000 mb:anl:ens mean

57:11964880:d=2024041400:PRES:surface:anl:ens mean

58:12220172:d=2024041400:HGT:surface:anl:ens mean

59:12372685:d=2024041400:TSOIL:0-0.1 m below ground:anl:ens mean

60:12513710:d=2024041400:SOILW:0-0.1 m below ground:anl:ens mean

61:12611804:d=2024041400:WEASD:surface:anl:ens mean

62:12695969:d=2024041400:SNOD:surface:anl:ens mean

63:12774603:d=2024041400:ICETK:surface:anl:ens mean

64:12807211:d=2024041400:TMP:2 m above ground:anl:ens mean

65:13055360:d=2024041400:RH:2 m above ground:anl:ens mean

66:13278710:d=2024041400:UGRD:10 m above ground:anl:ens mean

67:13548503:d=2024041400:VGRD:10 m above ground:anl:ens mean

68:13811193:d=2024041400:PWAT:entire atmosphere (considered as a single layer):anl:ens mean

69:13975206:d=2024041400:CAPE:180-0 mb above ground:anl:ens mean

70:14131705:d=2024041400:CIN:180-0 mb above ground:anl:ens mean

71:14239279:d=2024041400:PRMSL:mean sea level:anl:ens mean