



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Верификация прогноза температуры на месяц»

Исполнитель Лоза Анна Викторовна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Цепелев Валерий Юрьевич

(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«11» июня 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Обзор литературы.....	6
1.1. Система ансамблевого прогнозирования.....	6
1.2. Виды систем ансамблевого прогнозирования.....	14
1.3. Основные виды прогностической продукции.....	16
Глава 2. Используемые модели и базы данных.....	24
2.1. Используемые базы данных для оценки качества модельных долгосрочных прогнозов.....	24
Глава 3. Статистические инструменты, использованные в исследовании....	25
3.1. Методы оценки качества прогнозов.....	25
3.2. Классификация членов прогностического ансамбля.....	28
3.3. Описание процедуры выявления наиболее вероятного класса прогностического ансамбля.....	35
Глава 4. Оценка качества ансамблевого прогноза на второй прогностический месяц, по лучшему классу.....	38
4.1. Постановка задачи исследования.....	38
4.2. Цели исследования.....	41
Глава 5. Географическое распределение параметров оценок качества прогнозов по трем методам.....	42
5.1. Географическое распределение оценок качества прогноза по выбранному классу для 2 месяца прогноза.....	45

5.2. Географическое распределение оценок качества прогноза по всем членам ансамбля для 2 месяца прогноза.....	46
5.3. Географическое распределение оценок качества прогноза по всем членам ансамбля для 1 месяца прогноза.....	48
Глава 6. Анализ сравнения оценок качества ретроспективного прогноза CFSv2 за период с 2010-2018 год по трем методам.....	50
6.1. Оценка качества ансамблевого прогноза приземного давления по модели NCEP ретроспективного прогноза CFSv2 за период с 2010-2018 год.....	50
6.2. Оценка качества ансамблевого прогноза приземной температуры по модели NCEP ретроспективного прогноза CFSv2 за период с 2010-2018 год.....	55
Глава 7. Выводы, полученные из анализа результатов.....	61
7.1. Географическое распределение оценок качества прогнозов.....	61
7.2. Средние значения качества прогнозов для Северного полушария, без учета календарных особенностей.....	63
7.3. Сезонные и межгодовые особенности использования ретроспективных ансамблевых прогнозов модели CFSv2 по трем методам.....	64
Список литературы	65
Приложение А.....	67
Приложение Б.....	69
Приложение В.....	71
Приложение Г.....	73

Введение

Потребность общественности в ежемесячных прогнозах погоды неоспорима. Рост населения и технологическое развитие повышают уязвимость общества перед катастрофическими и разрушительными природными явлениями.

Проблема повышения порога предсказуемости метеорологических величин - тема фундаментальных исследований. В нелинейной системе, к которой принадлежит атмосфера, практически невозможно предсказать конкретный ход ее будущего развития, поскольку фактические начальные условия системы никогда не могут быть точно определены.

В последнее время проблема долгосрочного прогнозирования решалась только на основе эмпирических методов, основанных на анализе данных прошлых наблюдений и, в некоторой степени, на прогнозировании по аналогии. Они также используют статистические взаимосвязи между прогнозируемыми переменными и предикторами, дальние связи, цикличность и ритмичность. Быстрое развитие развитие гидродинамических моделей позволило перейти к решению задач долгосрочного прогнозирования на основе глобальных моделей атмосферы и океана.

Но на современном уровне качество эмпирических и гидродинамических методов все еще близко. Эмпирические методы, основанные на ограниченных данных наблюдений, учитывают лишь небольшую часть влияющих факторов. Обнаруженные ими связи со временем становятся нестабильными и не подходят для прогнозирования нестационарных процессов. Поэтому в будущем преимущество останется за гидродинамическим подходом.

Современные гидродинамические модели учитывают гораздо большее количество факторов и основаны на физических законах. У них существует множество ограничений из-за недостаточного пространственного разрешения модели и неполных исходных данных, что в результате приводит к ошибкам и влияет на качество прогнозов. Однако ошибки модели могут быть частично нейтрализованы на основе ансамблевого прогнозирования.

Предполагается, что ансамблевый метод прогнозирования предлагает полный прогностический набор возможных состояний атмосферных процессов в хаотической системе атмосферы. Но осреднение всех возможных состояний приближают прогноз к климатическому и не дают возможности предсказывать экстремальные события. Перед прогнозистом встает проблема определения вероятности осуществления в будущем тех или иных экстремальных погодных условий, но в связи с равной вероятностью осуществления в прогностическом наборе всех членов ансамбля, проблема пока не находит окончательного решения.

Подход к решению задачи совершенствования ансамблевого прогноза путем выбора наиболее вероятных членов ансамбля, из всей совокупности реализаций прогностических макропроцессов, предложен в данном исследовании. Подход показывает пути к улучшению качества ансамблевого долгосрочного прогноза.

В эпоху быстро изменяющегося климата потребитель более не может полностью рассчитывать на синоптические и статистические методы прогнозирования, основанные на принципах аналогичности. При отсутствии в архиве наблюдений аналогичных макропроцессов эти методы часто терпят фиаско. Альтернативные методы- гидродинамический, ансамблевый метод прогноза, в умеренных широтах Северного полушария пока имеет недостаточное качество и требует дальнейшего совершенствования. В связи с этим, данная исследовательская работа по совершенствованию ансамблевого прогноза актуальна на современном этапе развития ансамблевого

прогнозирования и востребована в практических применениях. В исследовании решается современная задача отсеивания наиболее вероятных реализаций прогнозов в их практически равновероятном наборе.

1. Обзор литературы

1.1 Система ансамблевого прогнозирования

Системы численного прогнозирования погоды используют современные численные модели атмосферы и помогают прогнозисту в производстве прогнозов погоды. При этом многие модели обеспечивают хорошее отображение метеорологических условий и могут применяться для подготовки автоматизированных прогнозов погоды. Ансамблевая система прогноза позволяет не только более точно предсказать состояние атмосферы, но и показать, где и когда прогноз заслуживает большего или меньшего доверия [6].

Результаты модели лучше воспроизводят одни метеорологические элементы, чем другие (например, температура поверхности отображается лучше, чем осадки). Однако хорошо известно, что даже прогнозы, основанные на лучших моделях, часто оказываются неверными. Прогноз погоды составляется по результатам анализа состояния атмосферы. Модель рассчитывает, как параметры атмосферы изменяются и развиваются. Теория хаоса означает, что изменения в атмосферных процессах очень чувствительны к небольшим ошибкам в этом предварительном анализе. Небольшая ошибка в анализе может вызвать значительную ошибку в прогнозе. Поэтому мы не можем делать идеальные прогнозы. Поэтому для прогноза используются ансамбли. Системы ансамблевого прогнозирования обеспечивают оценку неопределенности прогноза погоды. Вместо детерминированного прогноза модель запускается несколько раз при разных начальных условиях. Индивидуальные решения, составляющие ансамбли, называются членами

ансамбля. Для оценки неопределенности прогноза можно использовать разные решения. Неопределенность может меняться изо дня в день в зависимости от синоптической ситуации, а система глобального прогнозирования дает оценку неопределенности. Система используется для подготовки вероятностных прогнозов, чтобы дать оценку вероятности конкретного решения. Однако рекомендуется, чтобы данные о неопределенности присутствовали во всех прогнозах, что отражено в руководящих принципах по представлению неопределенности прогнозов (PWS-18, WMO / TD-No.1422).

На данный момент проблема выпуска ежемесячных и сезонных прогнозов стала одной из основных проблем в деятельности ВМО. В настоящее время успешность существующих систем прогнозирования, к сожалению, чуть более чем на месяц, превышает уровень прогнозов климата.

Так, например, данные ретроспективного архива прогнозов модели ПЛАВ и наблюдений станций позволили провести сравнительный анализ структуры временных рядов приземного воздуха. Оказалось, что несмотря на то, что модели имеют тенденцию повторять сезонные вариации, они недооценивают амплитуду и изменчивость и не повторяют структуру временных вариаций. Для улучшения прогноза погоды на месяц и год, для умеренного пояса и региона Российской Федерации, необходимо разработать единый план численных экспериментов для общей оценки и выборочной предсказуемости на месяц и год.

В 1969 году Эпштейном была разработана концепция вероятностных прогнозов. Результаты расчета численных моделей с нечеткими граничными условиями соответствуют распределению вероятностей в фазовом состоянии модели, а долгосрочное гидродинамическое прогнозирование погоды, основанное на этих разработках, называется «методом ансамблей».

Практическое решение стохастико-динамических уравнений было найдено с помощью их аппроксимации и методом Монте-Карло, который

предполагает последовательный расчет гидродинамической модели для каждого начального состояния ансамбля. Вариация членов ансамбля описывает неопределенность прогноза.

Метод ансамблей позволяет добавлять вероятностные условия к детерминированному прогнозу. Когда более одного члена ансамбля поддерживают конкретный прогнозный сценарий, вероятность того, что этот сценарий будет реализован, является самой высокой. Конфигурация ансамблей системы прогнозирования показана на рисунке 1.1.

Получающееся в результате поле среднего прогнозирования по ансамблю обеспечивает более точное прогнозирование, чем каждая из составляющих ансамбля в отдельности.

Но среднее по ансамблю поле может пока улучшать качество прогноза только до момента перестройки атмосферной циркуляции.

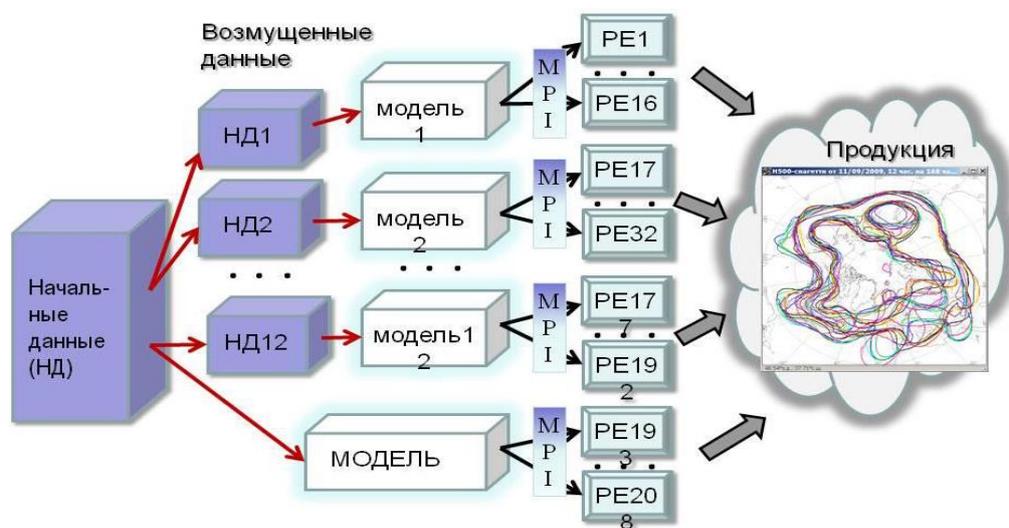


Рисунок 1.1 – Конфигурация ансамблевой системы прогноза

Системы ансамблевого прогнозирования (САП) представляют собой системы численного прогнозирования погоды (ЧПП), которые позволяют нам оценивать неопределенность в прогнозе погоды, а также наиболее вероятный исход. Вместо прогона модели ЧПП один раз (детерминированный прогноз) модель прогоняется много раз с несколькими различными исходными условиями. Во

многих случаях физика модели бывает также несколько возмущенной, а некоторые ансамбли используют более одной модели внутри ансамбля (мультимодельная САП) или одну и ту же модель, но с различными комбинациями схем физической параметризации (мультифизическая САП). Из-за стоимости многократного прогона модели ЧПП САП обычно прогоняется примерно с половиной горизонтального разрешения эквивалентной модели детерминированного ЧПП. Обычно САП включает контрольный прогноз, который использует модель с ансамблевым разрешением, но без каких-либо возмущений для анализа или модели. Отдельные решения ЧПП, которые составляют ансамбль, часто называются членами ансамбля. Серия различных решений в прогнозе позволяет оценивать неопределенность прогноза и то, насколько мы можем быть уверены в детерминированном прогнозе [1].

Неопределенность прогноза может значительно меняться день ото дня в зависимости от синоптической ситуации, а САП дает оценку этой суточной неопределенности. САП предназначена для изучения функции распределения вероятности (ФРВ) прогноза и часто используется для составления вероятностных прогнозов для оценки вероятности определенных результатов.

Следовательно, ансамблевый прогноз - это многократное интегрирование одной или нескольких атмосферных моделей с использованием немного различающейся информации о начальном состоянии атмосферы.

Система ансамблевого прогнозирования (САП) используется по следующим причинам:

- 1) Атмосфера хаотична;
- 2) Исходная информация обладает неточностью;
- 3) Численная модель несовершенна;

Чаще поведение системы можно представить, как функцию распределения вероятностей (ФПР –PDF). С развитием информационных технологий можно построить такой ФПР на период прогноза, используя большие по объему ансамбли прогнозов.

Реализация ансамблевого подхода:

Простейший ансамбль - это набор прогнозов, которые начинаются с немного разными (возмущенными) начальными данными (ансамбля начальных данных).

Ансамбль начальных данных должен:

- 1) Содержать равновероятные члены;
- 2) Быть репрезентативной выборкой возможных состояний атмосферы;
- 3) Включать истинное состояние атмосферы (т.е. разброс достаточно велик);
- 4) Возмущения должны быть в пределах ошибок анализа;

Преимущества использования ансамблевого подхода:

- 1) Разброс ансамбля описывает качество прогноза в зависимости от ситуации;
- 2) Среднее по ансамблю дает наилучшую оценку (по сравнению с детерминированным прогнозом) истинного состояния атмосферы (даже с использованием модели с низким разрешением!);
- 3) Легко получить вероятностный прогноз явлений погоды;

В РФ система оперативного усвоения данных наблюдений и объективного анализа имеется в Гидрометцентре РФ. В качестве входной информации служат разнородные наблюдения: традиционные контактные, новые спутниковые, радиолокационные и другие дистанционные. Принцип подготовки исходной информации представлен на рисунке 1.2.

«Принцип действия» системы:

- 1) Данные (~ 5 гб) собираются в системе сбора данных Росгидромета и направляются в ГМЦ;
- 2) В ГМЦ данные сортируются по типам, датам, «раскладываются» по директориям временного хранения и архивируются;
- 3) Автоматизированная обработка первичной информации осуществляет раскодировку и формирование «файлов для анализа»
- 4) Регулярно (каждые 6 часов) стартует программа формирования полей первого приближения из полей численных прогнозов НСЭП или отечественной прогностической модели.
- 5) Осуществляется пространственно-временная интерполяция полей первого приближения на точки наблюдений
- 6) Стартует анализ, который оптимально объединяет информацию из первого приближения и наблюдений.
- 7) «Финальный аккорд» - добавление инкремента анализа к первому приближению сформированием полей анализа.

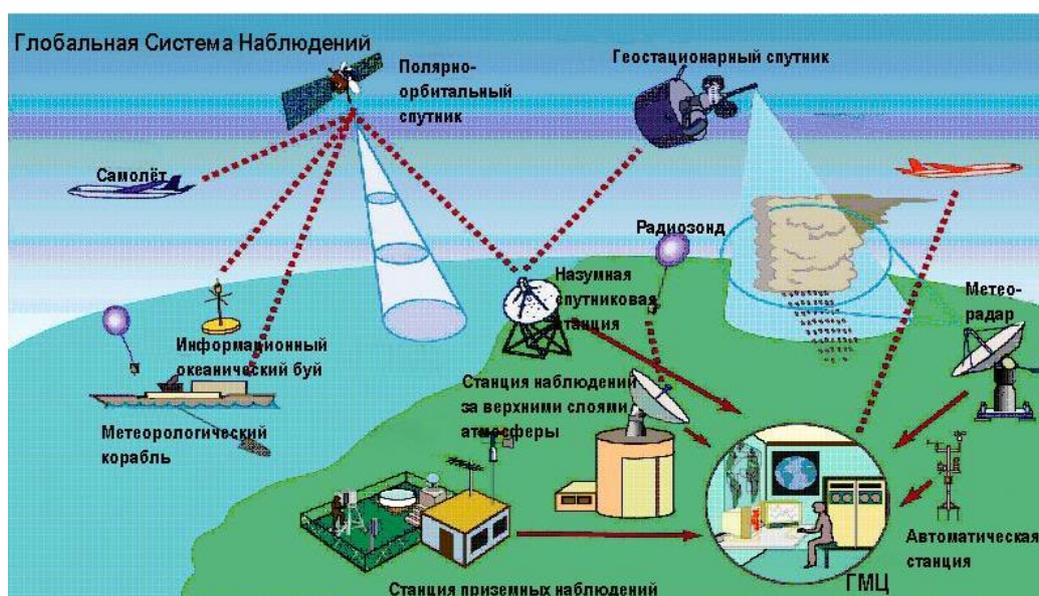


Рисунок 1.2 – Технологическая схема ансамблевых прогностических систем

Для получения ансамбля начальных полей используются различные методы:

- 1) Метод Монте-Карло (возмущение начальных данных случайным образом, недостаток – быстрое затухание);
- 2) Лаговое интегрирование (использование последовательных во времени сроков начальных данных);
- 3) Бридинг метод – выращивание быстрых мод;
- 4) Сингулярные векторы (в основе идея Лоренца, что динамика малой ошибки подчиняется линейному закону);
- 5) Стохастическая физика (возможный способ возмущения уравнений модели);
- 6) Мультимодельный подход;

В краткосрочных и среднесрочных прогнозах предпочтение отдается методам возмущения начальных данных. Для прогноза на период выше среднего основное внимание уделяется изменению граничных условий и параметров модели.

Результаты интеграции модели каждого начального состояния образуют набор траекторий. Прогноз, основанный на среднем значении или медианной характеристики, в среднем дает более точную оценку, чем прогноз, рассчитанный от невозмущенного начального состояния атмосферы. В целом, чем больше размер ансамбля, тем выше качество прогнозов. Для выполнения расчетов по большим ансамблям необходимы очень мощные инструменты расчета. Системы ансамблевого прогнозирования могут быть реализованы

только с помощью мощного суперкомпьютера. В настоящее время они активно развиваются во всем мире, в том числе и в России.

Окончательный прогноз ожидаемых значений или отклонений от прогноза, основанный на скорректированных средних значениях ансамблевого расчета, может быть представлен в виде карт или таблиц. Прогнозы могут быть представлены в детерминированной и вероятностной формах. Вероятностный прогноз метеоэлементов обычно рассчитывается в виде прогностических вероятностей трех градаций (выше нормы, норма, ниже нормы), границы которых определены по климатическому распределению.

Карты, представленные в терминах вероятности, дополнительно позволяют прогнозисту:

- 1) Расширить диапазон применения синоптического долгосрочного прогноза путем предоставления потребителю вероятностной оценки рисков осуществления того или иного экстремального явления;
- 2) Определить географические районы, для которых прогноз выпускается с высокой или низкой степенью уверенности;
- 3) Оценить вероятность осуществления того или иного знака прогностической аномалии метеопараметра по выбранному географическому району, по которому выпускается прогноз, необходимую для принятия обоснованного экономического решения потребителем;
- 4) Изучить различные сценарии макропогоды для района прогноза.

В 2007—2008 году ансамблевая система среднесрочного прогноза погоды была реализована и в РФ. Система основана на использовании спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России. Ансамбль включает 28 членов. В ближайшее время планируется увеличение размера ансамбля до 32 членов, улучшение разрешения спектральной модели и дополнительное

использование конечно-разностной модели. Каждый экземпляр задачи «модель» будет считаться на 32 процессорных элементах, а всего для работы системы их потребуется 1024. Ансамблевая система прогноза позволяет не только более точно предсказать состояние атмосферы, но и показать, где и когда прогноз заслуживает большего или меньшего доверия [10].

Конечным показателем эффективности модели является качество прогнозов. Имеется множество количественных критериев для оценки качества, например RMSE, коэффициент корреляции аномалий (AC), параметр ROC, которые подробно будут рассмотрены ниже.

1.2 Виды систем ансамблевого прогнозирования

Существует три основных типа ансамблевого прогнозирования (глобальный, региональный и конвективного масштаба). Они охватывают различные временные масштабы при прогнозировании. Каждая из этих категорий имеет множество вариаций, например, то, как возникают возмущения и как используются модельные вариации в самих моделях. Однако принцип использования ансамблей остается прежним.

1) Глобальные САП обычно разрабатываются и используются для среднесрочного прогноза на 3–15 дней вперед. Они используют глобальные модели ЧПП и двигаются с низким разрешением с шагом сетки от 30 до 70 км. Хотя в первую очередь они предназначены для среднесрочного использования, их глобальный охват также может использоваться для создания краткосрочных прогнозов САП в тех регионах мира, где другие САП недоступны, и могут быть единственным вариантом, доступным для многих стран всемирной метеорологической организации. В этом контексте они широко используются для производства продукции в целях поддержки различных проектов в рамках Показательного проекта по прогнозированию явлений суровой погоды (ПППСР). Синоптики, использующие глобальные

САП, всегда должны помнить, что низкое разрешение сетки ограничивает детали, которые можно ожидать в их прогнозах [1].

2) САП на основе региональных моделей или моделей ограниченного района (ЛАМ) используют региональные модели для небольших территорий и больше фокусируется на краткосрочных прогнозах на 1–3 дня вперед. Они используют более высокое разрешение шага сетки, чем глобальная САП, обычно от 7 до 30 км, что позволяет им прогнозировать больше местных погодных условий и воспроизводить более интенсивные погодные системы. Однако синоптик должен знать об ограничениях разрешения; например, не следует ожидать, что региональные САП будут прогнозировать мелкомасштабные элементы системы, такие как гром [1].

Региональная САП должна воспринимать граничные условия (метеорологические системы, движущиеся в район из пределов региона) из результатов расчета глобальной САП. Некоторые региональные САП используют региональный анализ с высоким разрешением и рассчитывают соответствующие толчки с высоким разрешением, в то время как другие просто берут исходные условия и толчки из той же глобальной САП, которая обеспечивает граничные условия; это то, что обычно называют уменьшением масштаба. В САП уменьшенного масштаба прогноз должен выполняться в течение нескольких часов, прежде чем модель сможет «раскрутить» элементы с более высоким разрешением [1].

3) САП конвективного масштаба с сеткой от 1 до 4 км на относительно небольших площадях теперь доступны в нескольких более развитых центрах. Эти модели, иногда называемые моделями конвекции, способны отображать определенные элементы больших конвективных систем и поэтому пытаются спрогнозировать такие элементы, как местоположение и интенсивность гроз. Хотя это предлагает большой потенциал для улучшения прогнозов, конвективные системы развиваются очень быстро и обладают способностью краткосрочного прогнозирования, что позволяет прогнозам быть случайными.

Следовательно, системы ансамблевого прогнозирования очень важны для численного прогнозирования погоды в конвективной шкале, поскольку конвективная нестабильность увеличивает прогнозируемую неопределенность в новом масштабе, которая не показана для моделей с более низким разрешением и гораздо более короткими временными масштабами [7].

Помимо конвекции, модели этого разрешения значительно улучшили способность прогнозировать другие специфические характеристики местных погодных условий, такие как низкая облачность и видимость для авиации.

Топографические условия сильно влияют на многие из этих явлений, что может привести к большей предсказуемости, если такое ограничение (например, склоны, берега, растительность, альбедо) можно смоделировать (например, конвекция или долинный туман). САП конвективного масштаба может предоставлять информацию о предсказуемости всех этих погодных элементов [1].

1.3 Основные виды прогностической продукции

Системы прогнозирования на основе ансамблей обеспечивают доступ к большому количеству результатов. Есть несколько способов представления прогностических ансамблей.

Самый простой способ представления результатов - это карты средних по ансамблю. В предыдущих работах были случаи устойчивого преимущества прогнозов перед детерминистическим прогнозом при использовании среднего по ансамблю. Простое усреднение всех членов ансамбля, помимо сглаживания обычных мелкомасштабных характеристик, может привести к полному искажению фактического развития. В этом случае роль даже одного члена может быть очень важной.

Карты стандартного отклонения широко используются для описания разброса значений метеорологических параметров внутри ансамбля. Они позволяют определять районы, где метеорологические поля изменяются больше всего и наименьшую надежность прогнозов.

Разброс значений параметров в ансамбле хорошо отражает «дымовой шлейф», используемый для визуализации увеличивающегося разброса метеорологических значений со временем.

Карты «спагетти» (spaghetti), в которых с помощью характерной изолинии все члены ансамбля представлены одновременно, и карты «стампов» (postage stamps) - карты в размер почтовых марок, представляющие все возможные сценарии развития атмосферных процессов в ансамбле также используются для визуализации прогнозов.

Большинство продуктов прогноза представляют собой карты распределения вероятностей метеорологических явлений: отклонений температуры и осадков, снежного покрова и т. д. Интерпретация «стампов» оставляется синоптику в апостериорном виде, то есть когда ученые после экстремальных погодных явлений тщательно анализируют набор прогнозов для диапазона, который был получен в прошлом.

Целый ряд основных видов продукции производится большинством САП непосредственно на основе выходных полей моделей. Как правило, к их числу относятся следующие виды продукции [1].

1.3.1 Средняя величина по ансамблю

Это простой средний показатель параметра среди всех членов ансамбля. Средняя величина по ансамблю обычно лучше обеспечивает проверку оправдываемости, чем контрольный прогноз по наиболее стандартным оценкам оправдываемости (среднеквадратическая ошибка, средняя абсолютная ошибка, временной коэффициент корреляции аномальных

значений и т. д.), поскольку она сглаживает непредсказуемые элементы и просто представляет более предсказуемые элементы прогноза. Это может обеспечить хорошую основу для той части прогноза, которую можно спрогнозировать с уверенностью, но которой нельзя доверять как таковой, т. к. она будет редко улавливать риск наступления экстремальных явлений [1].

1.3.2 Разброс по ансамблю

Рассчитывается как (несмещенное) стандартное отклонение выходной переменной модели и дает меру уровня неопределенности параметра в прогнозе. Часто отмечаются на картах с наложением средней величины по ансамблю. На рисунке 1.3 черными контурами показаны значения среднего давления по ансамблю, приведенные к среднему уровню моря (ДСУМ) и залитые разными цветами – разброс ДСУМ. Области, выделенные ярким цветом, указывают на больший разброс и, следовательно, более низкую предсказуемость [1].

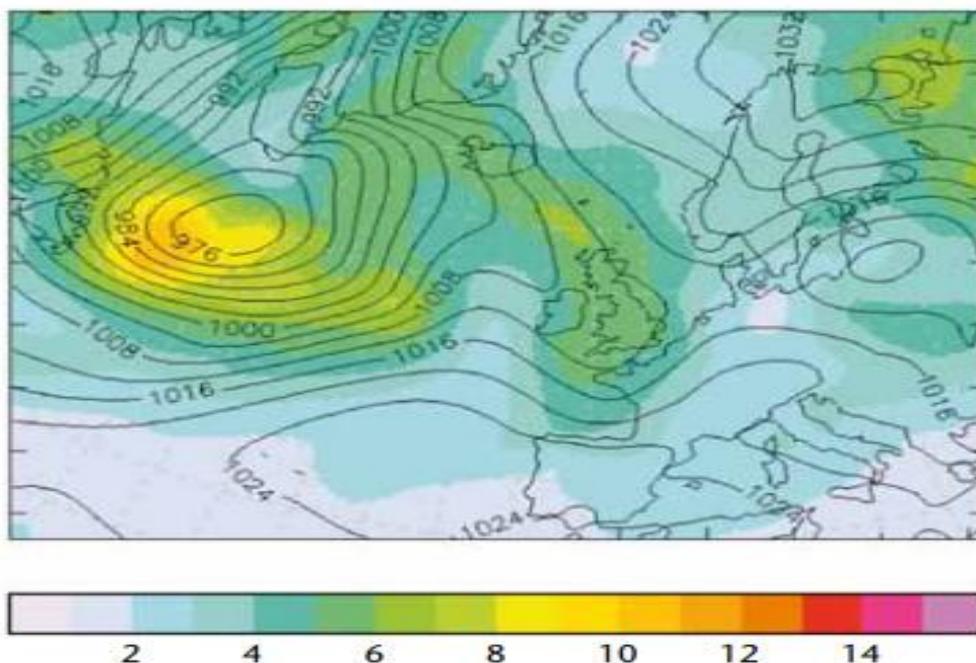


Рисунок 1.3 – Средние величины (контурные линии) и разброс (заливка разного цвета) для прогноза давления, приведенного к СУМ (на 72 часа)

1.3.3 Базовая вероятность

Вероятность часто оценивается как простое соотношение членов ансамбля, которые прогнозируют наступление события в конкретном месте или точке сетки, например, температуру (на уровне 2 м) ниже 0° по Цельсию или более чем одно стандартное отклонение ниже нормы. На рисунке 1.4 заливкой разного цвета показана вероятность порывов ветра более 40 узлов. Среднее по ансамблю давление, приведенное к СУМ, также включено в виде контуров серого цвета. Следует отметить, что данное определение вероятности не является истинной байесовской вероятностью, как было бы определено специалистом по статистике, но оно обеспечивает полезную оценку для практических целей. Оно содержит предположение, что модель точно отражает климатическое распределение наступления события. Вероятностные прогнозы, подготовленные таким образом, должны всегда проверяться на больших выборках случаев, чтобы определить степень, с которой прогностические вероятности соотносятся с наблюдаемой частотой [1].

1.3.4 Квантили

Набор квантилей распределения ансамбля может обеспечить краткое описание неопределенности. Обычно используются максимальные и минимальные квантили распределения ансамбля, а также 25-й, 50-й (медиана) и 75-й процентиля. Среди других часто используются 5-й, 10-й, 90-й и 95-й процентиля [1].

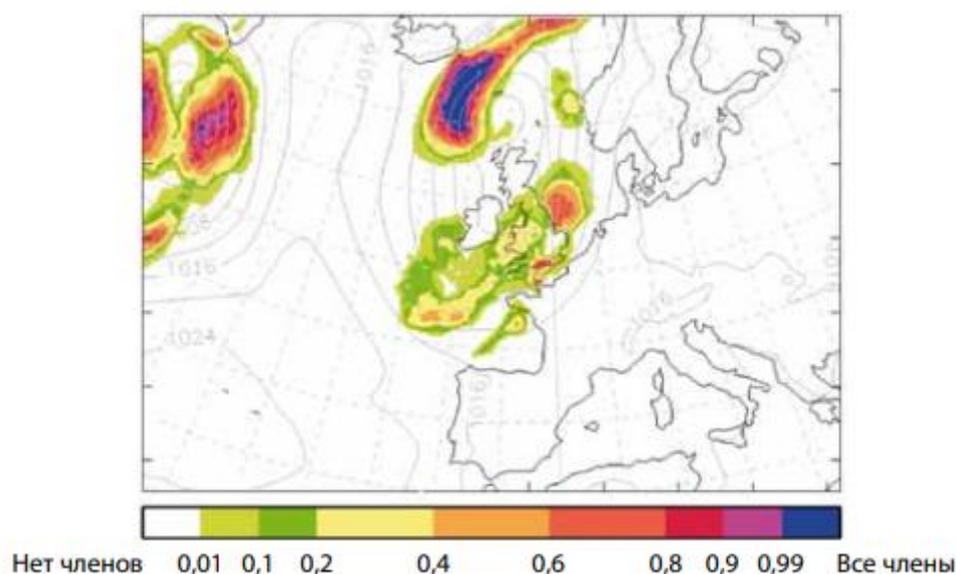


Рисунок 1.4 – Карта вероятности порывов ветра более 40 узлов по данным региональной системы MOGREPS на 16 июля 2010 г. в 03.00 МСВ (на 21 час от 15 июля 2010 г. в 06.00 МСВ); среднее по ансамблю давление, приведенное к СУМ, нанесено как слабый фон

1.3.5 Карты-спагетти

Карты, показывающие несколько выбранных контуров переменных (например, контуры 528, 546 и 564 Дм высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа) из всех членов ансамбля, могут дать полезное изображение предсказуемости поля. Там, где все контуры членов ансамбля расположены близко друг к другу, предсказуемость выше; там, где они выглядят как спагетти на тарелке, предсказуемость ниже (см. рисунок 1.5) [1].

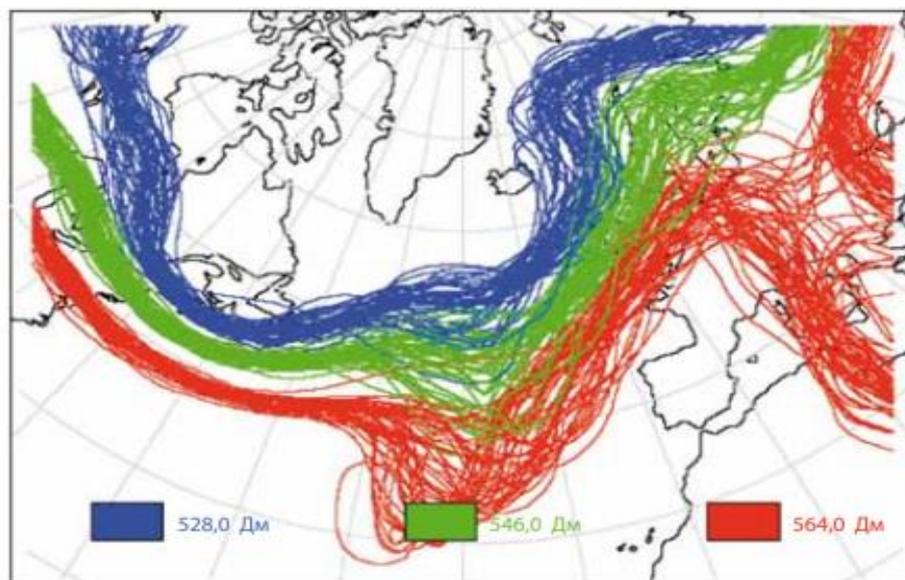


Рисунок 1.5 - Графики-спагетти ансамблевого прогноза высоты геопотенциала на уровне 500 гПа на 11 февраля 2001 г. в 12.00 МСВ (на 96 часов от 7 февраля 2001 г. в 12.00 МСВ)

1.3.6 Карты-почтовые марки

Набор небольших карт, показывающих контурные диаграммы отдельно взятого члена каждого ансамбля (см. рисунок 1.6), позволяет прогнозисту рассматривать сценарии в прогнозе каждого члена и оценивать возможные риски экстремальных явлений. Однако это большой объем информации, который трудно усвоить визуально [1].

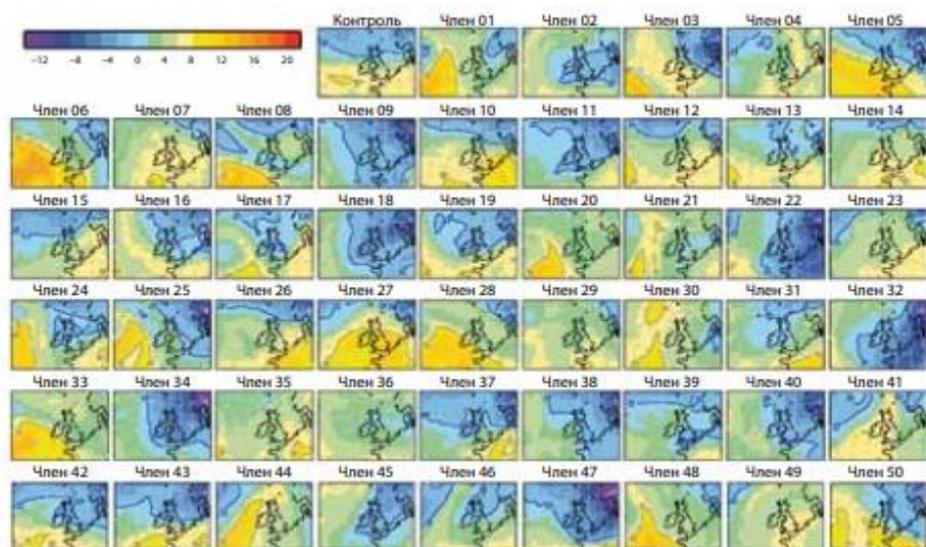


Рисунок 1.6 - Карта-почтовая марка на 7 февраля 2009 г. в 12.00 МСВ (потенциальная температура по мокрому термометру на уровне 850 гПа, в градусах Цельсия; на 300 часов от 26 января в 00.00 МСВ)

1.3.7 Метеограммы для конкретных пунктов прогноза

Выходные переменные модели можно выбрать из прогностической сетки для конкретной координаты на местности. Одним из наиболее часто используемых инструментов является метеограмма ансамбля (или САП-грамма), которая использует диаграмму вида «ящик с усами» для иллюстрации основных процентильных пунктов прогностического распределения для одной или нескольких переменных (см. рисунок 1.7) [1].

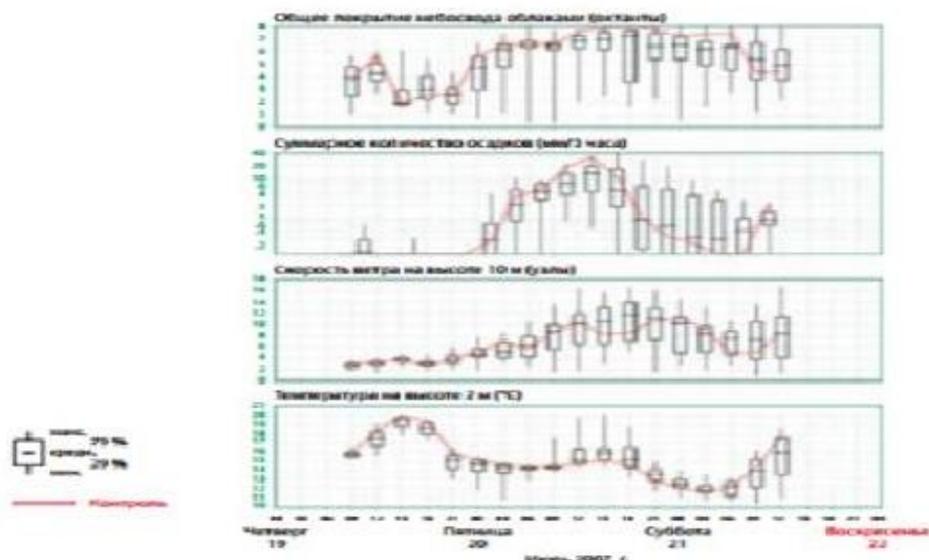


Рисунок 1.7 - Метеограмма европейской САП системы MOGREPS для Брайз Нортон (51,8 °с.ш., 1,6 °з.д.) с 19 июля 2007 г. в 09.00 МСВ по 21 июля 2007 г. в 12.00 МСВ

В целом, следует отметить, что за исключением средних карт, карт дисперсий и карт «стампов», остальные способы никогда не использовались ранее для визуализации прогностической информации в оперативной практике и требуют соответствующего обучения прогнозистов, чтобы избежать неоднозначной интерпретации ансамблевого прогнозирования [1].

2. Используемые модели и базы данных

2.1 Используемые базы данных для оценки качества модельных долгосрочных прогнозов

Для оценки качества модельных прогнозов была использована программа «Синоптик-Долгосрочник», разработанная В.Ю. Цепелевым в ФГБУ «Северо-Западный УГМС».

В программе используются базы данных приземного давления, температуры и осадков получаемые из следующих проектов:

- I. Проект «Twentieth Century Reanalysis Project», поддерживаемый в U.S. Department of Energy, Office of Science Innovative and Novel Computational Impact on Theory and Experiment (DOE INCITE) program, and Office of Biological and Environmental Research (BER), and by the National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Program Office.". Данные с 1890 года по 2014 год.
- II. Проект «NCEP/NCAR Reanalysis 1», поддерживаемый в NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA. Данные с 1948 года по настоящий момент.
- III. Проект NCEP Климатический Ретроспективный Прогноз (CFCv2) [5]. Данные с 2010 по 2018 годы. Используются следующие параметры:
 - Приземное атмосферное давление (в гектопаскалях);
 - Температура воздуха на высоте 2 метра (в градусах Цельсия);
 - Среднемесячные значения модельных дисперсий гидрометеорологических параметров;
 - Среднемесячные модельные климатические нормы.

Все используемые данные представлены в бинарном виде в узлах регулярной сетки, покрывающей весь Земной шар со следующим разрешением:

1. Данные температуры воздуха на высоте 2 метра находятся в узлах регулярной Гауссовой сетке размерностью 192x94 узла. Пространственный шаг сетки составляет $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ по широте и долготе. Начало отсчета находится в точке с координатами 88.54° ю.ш. и 0.0° в.д., конечная точка имеет координаты 88.54° с.ш. и 358.125° в.д. [8].
2. Данные давления на уровне моря находятся в узлах регулярной широтно-долготной сетки размерностью 180x91 узла. Пространственный шаг сетки составляет $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ по широте и долготе. Начало отсчета находится в точке с координатами 90° ю.ш. и 0.0° в.д., конечная точка имеет координаты 90° с.ш. и 358.0° в.д. [8].
3. Данные прогностической модели CFCV2 находятся в узлах регулярной широтно-долготной сетки размерностью 360x181 узел. Пространственный шаг сетки составляет $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ по широте и долготе. Начало отсчета находится в точке с координатами 90° ю.ш. и 0.0° в.д., конечная точка имеет координаты 90° с.ш. и 359.0° в.д. [8].

В связи с тем, что разные базы данных имеют различный шаг сетки, то приведения их к однородному массиву в задаче оценки качества прогнозов, все данные были интерполированы в сетку с шагом в 1 градус по широте и долготе.

3. Статистические инструменты, использованные в исследовании.

3.1 Методы оценки качества прогнозов.

Показателем эффективности прогностической методики является качество прогнозов погоды. Количественные оценки качества прогнозов, которые используются в исследовании, рассчитывались с учетом рекомендаций ВМО [9] и РД 52.27.284-91 [2,3], а также накопленного опыта по составлению долгосрочных прогнозов в Гидрометцентре России.

В качестве основных оценок детерминистических прогнозов использовались следующие показатели.

3.1.1 Коэффициент корреляции знаков аномалий температуры воздуха

$$RO = \frac{n_+ - n_-}{N}$$

Где n_+ и n_- число оправдавшихся и не оправдавшихся прогнозов, N - их общее число.

3.1.2 Коэффициент корреляции аномалии

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{ij} - \bar{f}_{ij})(X_{ij} - \bar{X}_{ij})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_{ij} - \bar{f}_{ij})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_{ij})^2}}$$

где:

f_{ij} – прогностическое значение аномалии в узле сетки;

\bar{f}_{ij} – среднее прогностическое значение аномалии в узле сетки;

X_{ij} – фактическое значение аномалии в узле сетки;

\bar{X}_{ij} – среднее фактическое значение аномалии в узле сетки;

3.1.3 Среднеквадратичная ошибка (root mean squared error) прогноза:

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} - X_{ij})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad 2.3$$

где:

f_{ij} – прогностическое значение аномалии в узле сетки;

X_{ij} – фактическое значение аномалии в узле сетки;

n – общее число узлов сетки данных (длина ряда);

3.1.4 Параметр ROC

Для оценки качества вероятностных прогнозов аномалий температуры воздуха был использован показатель ROC, подробно описанный в Наставлении ВМО по глобальной системе обработки данных и прогнозирования [2]. В последние годы параметр ROC нашел широкое применение при проверке оправдываемости долгосрочных прогнозов погоды в вероятностной форме в ведущих мировых прогностических центрах [3].

Сравнительная оперативная характеристика прогнозов (COX), в англоязычной литературе соответственно Relative Operating Characteristic (ROC) рассчитывается по группам прогнозов определенного явления (например, превышение температурой заданного критического уровня) с вероятностью не ниже заданного порога P_n . В каждой группе рассчитывается относительная доля удавшихся прогнозов (HR) и ложных тревог (FAR). Пары значений HR и FAR, полученные для разных уровней пороговой вероятности, представляют в виде графика. Линия равенства HR и FAR соответствует случаям отсутствия полезной прогностической информации. Интегральной оценкой COX является площадь под кривой графика соответствия HR и FAR. Для идеального прогноза $COX = 1$.

При известной априорной вероятности прогнозируемого явления значения HR и FAR позволяют рассчитать оценки потенциальной экономической эффективности прогностической информации в зависимости от параметра r , характеризующего степень зависимости потребителя от прогнозируемого явления, где: $r = C/L$ (здесь C и L — меры затрат на предотвращение ущерба и потерь соответственно).

В качестве такой оценки рассматривается относительный выигрыш потребителя при ориентации его на методический прогноз вместо климатического. Важной ее составляющей является выбор пороговой вероятности, при которой следует принимать прогноз во внимание.

В нашем случае рассматриваются три градации прогностических аномалий температуры воздуха (выше нормы, норма, ниже нормы). Для графического отображения градаций прогноза используется традиционная цветовая шкала (оттенки красного – градации вероятности осуществления положительной аномалии, оттенки зеленого - градации вероятности осуществления аномалии около нормы, оттенки синего - градации вероятности осуществления отрицательной аномалии).

Для каждой прогностической градации рассчитывается вероятности ее осуществления. Вероятность осуществления градации - это отношение числа случаев прогнозов, относящихся к данной градации, к общему объему выборки всех прогнозов. Соответственно, цветовые оттенки в направлении от светлого тона к темному означают возрастание значения вероятности. Равновероятные значения для всех градаций указывают на неопределенность прогноза и имеют заливку белого цвета.

3.2 Классификация членов прогностического ансамбля

Ансамблевое прогнозирование - это метод, результатом которого является набор (или ансамбль) равновероятных прогнозов (членов ансамбля) представляющий весь диапазон возможных будущих состояний атмосферы. В идеале, будущее состояние атмосферы должно находиться в пределах прогнозируемого ансамблевого разброса.

Для анализа большого объема информации, содержащейся в ансамблях, могут использоваться процессы классификации (кластеризации), направленные на группирование схожих, в полях одного или нескольких гидрометеорологических параметров, членов ансамбля. Классификация обычно проводится по определенному географическому региону. В науке известны три метода классификации объектов: иерархический, фасетный,

дескрипторный. Эти методы различаются разной стратегией применения классификационных признаков.

а) Иерархический метод характеризуется последовательным делением заданного множества объектов на подчиненные подмножества. Учитывая жесткую процедуру построения структуры классификации, необходимо на первом этапе определить какими свойствами должны обладать объединяемые в подмножества объекты. Эти свойства принимаются за признаки классификации.

Для эффективного использования иерархического метода классификации необходимо выполнение следующих правил:

- Деление множества следует начинать с наиболее общих признаков.
- На каждой ступени можно использовать только один признак.
- Разделение объектов должно осуществляться последовательно от большего к меньшему, от общего к частному.
- Необходимо установить оптимальное число признаков, ступеней и глубину классификации.

Достоинствами иерархического метода классификации являются:

- Простота построения;
- Возможность выделения общности и сходства признаков объектов на одной и разных ступенях;
- Высокая информационная насыщенность;
- Обзорность.

Недостатками метода являются:

- Громоздкость;
- Высокая вычислительная затратность процесса;
- Трудность применения метода за счет его многоступенчатости.
- При небольшой глубине вложения – информационная недостаточность и неполный охват объектов и признаков.

б) Фасетный метод классификации – предусматривает параллельное разделение множества объектов на отдельные независимые одна от другой группы или фасеты, по одному из признаков в каждой.

Правилами фасетного метода являются:

- Одинаковая значимость и независимость классификационных признаков;
- Отсутствие общности классификационных признаков;
- Возможность дополнения количества признаков.

Достоинствами этого метода являются:

- Гибкость системы классификации;
- Удобство использования;
- Возможность ограничения количества признаков без утраты достаточности охвата.

Недостатками фасетного метода классификации являются:

- Невозможность выделения общности и различий между объектами в разных классификационных группировках;
- Низкая информативность.

Для классификации ансамблевых прогнозов существует несколько стандартных иерархических алгоритмов кластеризации результат, которых зависит от выбранных переменных.

Так, например, классификация прогнозов, которая проводится в Европейском Центре Среднесрочных Прогнозов Погоды, и в качестве шаблона использующая заранее выделенные типы макросиноптического положения, преследует перед собой следующие цели:

- Определить наиболее вероятное развитие процессов в будущем, путем сравнения тех членов ансамбля, которые имеют максимальное сходство с жестко заданным типом режима погоды.
- Рассчитать вероятность реализации в ансамбле тех или иных членов с заданным типом режима погоды, как функции от количества членов ансамбля в классе.
- Скорректировать прогноз на следующий месяц с учетом наиболее вероятного типа режима погоды в прогностическом ансамбле.

Задача выделения наиболее вероятного класса, по которому строились бы прогностические поля, перед исследователями не стояла. Кроме того, типизация проводится только для среднесрочных ансамблевых прогнозов и не производится для долгосрочных прогнозов [4], что не позволяет использовать ее в качестве образца в нашем исследовании.

В данном исследовании применялся иерархический алгоритм классификации. Классификация используется для разделения членов прогностического ансамбля на группы (кластеры) по признакам сходства пространственного распределения аномалий температуры воздуха на высоте 2 метра и аномалий приземного давления на пространстве Северного полушария от экватора до полюса. Расчет степени сходства полей аномалий членов ансамбля производится по всем узлам регулярной сетки данных с шагом один

градус как по широте, так и по долготе. Для унификации шага сетки прогностической модели и данных реанализа, с которыми проводится сравнение прогнозов, было произведено сгущение сеток всех баз данных до размерности 1 градус по широте и долготе.

Для проведения классификации в исследовании использовался алгоритм, заложенный в программном продукте «Синоптик-Долгосрочник».

С целью проведения классификации в нем используется мера комплексного сходства, рассчитываемая как между полями аномалий приземного давления, так и температуры. Для расчета комплексной меры сходства используется простой, надежный и хорошо зарекомендовавший себя в оперативной практике метод расчета по параметру Хейдка. Метод базируется на сравнении по знаку двух полей аномалий метеопараметров в узлах регулярной сетки данных. Поля аномалий последовательно сравниваются по приземному давлению и температуре по формуле:

$$SS = ((S - F) / (N - F)) * 100$$

$F = N/2$ (2 - число градаций)

S - число совпавших точек в двух сравниваемых полях

N - общее число точек

При расчете параметра Хейдке по аномалиям того или иного параметра, весь диапазон разброса аномалий разбивается на 3 градации - ниже нормы, норма и выше нормы. Мера близости Хейдке (количество степеней свободы 3) может изменяться от (-50) до (+100). За диапазон нормы берется разброс значений параметра около нуля шириной в одну сигму. Сигмы

рассчитываются для каждой точки поля параметра по всему ряду наблюдений с 1900 по 2010 годы.

Сравнение проводится по двум типам полей – полям аномалий среднемесячного приземного давления и температуры. В качестве меры близости между членами ансамбля берется комплексный параметр **SS**, рассчитываемый как средний параметр по приземному давлению и температуре. При этом, в расчете среднего, параметр **SS** по температуре учитывается с понижающим коэффициентом равным 0,8. Максимальное значение комплексного параметра **SS** показывает максимальную степень близости по знаку аномалии двух членов ансамбля.

Классификация членов ансамбля проводится по алгоритму, реализованному в программном продукте «Синоптик-Долгосрочник».

Алгоритм предполагает:

- 1) Количество классов в ансамбле заранее не известно;
- 2) Класс состоит не менее, чем из 2 членов ансамбля;
- 3) Присоединение новых членов ансамбля к классу прекращается, когда параметр сходства между последним присоединенным членом ансамбля и ядром класса уменьшается на величину, превышающую «критерий сходства»;
- 4) Критерий сходства можно произвольно устанавливать, но в данном исследовании он равен значению **0,06**.

Последовательность шагов в алгоритме процедуры классификации:

- 1) Первый член ансамбля принимается за ядро первого класса.

2) Первый член ансамбля и последовательно сравнивается со всеми оставшимися членами ансамбля.

3) В ансамбле находится такой член, который имеет максимальное сходство с первым членом ансамбля, этот член ансамбля приписывается к первому классу и исключается из дальнейших расчетов.

4) Ищется новый член ансамбля, максимально близкий к ядру класса.

5) Если разница между следующими параметрами сходства – параметр сходства между ядром класса и первым членом ансамбля и параметр сходства между ядром класса и следующим максимально близким членом ансамбля - меньше «критерия сходства», то этот новый член ансамбля включается в класс и так же исключается из дальнейших расчетов.

6) Если указанная разница превышает величину «критерия сходства», то этот член ансамбля не включается в класс, а формирование класса завершается.

7) В качестве ядра второго класса берется первый по порядку из оставшихся в рассмотрении членов ансамбля и ищется член ансамбля максимально к нему близкий.

8) Расчеты продолжаются до тех пор, пока все члены ансамбля не будут упакованы в классы.

Для оценки однородности полученных классов рассчитывается дисперсия параметров сходства внутри каждого из них. Преимущество, при прочих равных условиях, при выборе лучшего класса, который осуществляется на следующем шаге расчетов, отдается классу с меньшей дисперсией.

После того, как классификация ансамбля проведена, то весь ансамбль распадается на некоторое количество классов (неопределенное заранее),

которые отличаются друг от друга по пространственному распределению полей аномалий приземного давления и температуры.

3.3 Описание процедуры выявления наиболее вероятного класса прогностического ансамбля.

Для реализации данного метода в исследовании использовался программный продукт «Синоптик-Долгосрочник». Выбор лучшего класса ансамбля происходит по описанному ниже алгоритму. Для проведения процедуры выбора лучшего класса прогностического ансамбля необходимо иметь ансамблевый прогноз на 2 месяца вперед, а процедуру выбора можно применять только тогда, когда появятся фактические данные наблюдений и станет возможно оценить качество прогноза в первом месяце.

Например, для процедуры выбора наиболее вероятного класса для прогноза на *июль*, необходимо иметь:

- Ансамблевый прогноз, рассчитанный в конце *мая* на *июнь* и *июль*.
- Данные наблюдений за *июнь*.

В этом случае производятся следующие расчеты:

- Классификация членов прогностического ансамбля *июня*;
- Сравнение каждого класса ансамбля с фактическими данными наблюдений в *июне*;
- Класс созданный из *июньских* прогнозов, у которого оказалось наилучшее сходство с *июньскими* полями наблюдений приземного давления и температуры, считается наиболее вероятным прогностическим классом;
- По членам ансамбля, которые входят в прогностический класс, составляется прогноз на *июль*.

Алгоритм процедуры выбора наиболее вероятного класса:

1) Провести процедуру классификации членов прогностического ансамбля по полям аномалий приземного давления и температуры первого месяца прогноза (Рис. 2.1).

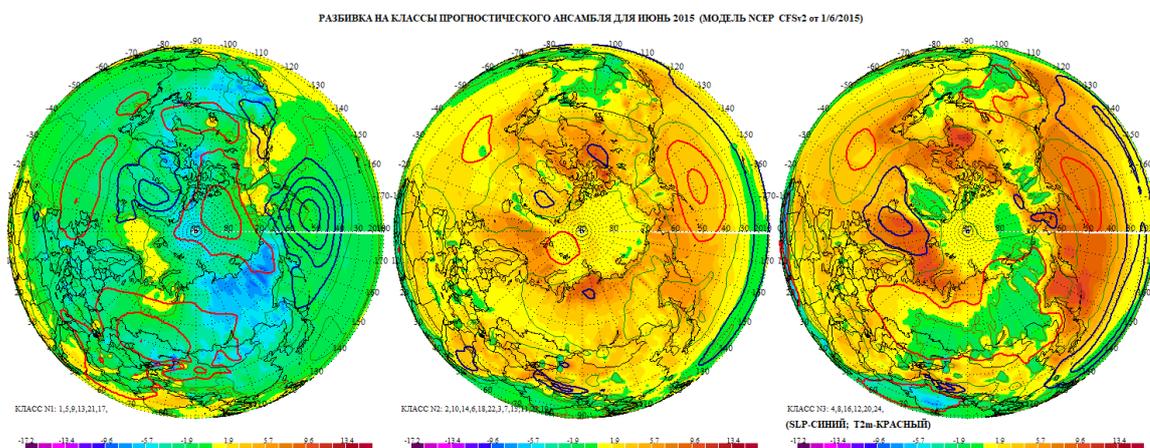


Рисунок 2.1 Карты классов прогностического ансамбля.

2) Каждый из выделенных классов первого месяца прогноза сравнивается с фактическими полями наблюдений из базы данных реанализа. Сравнение происходит с использованием комплексной меры сходства описанной в разделе классификации прогностического ансамбля. Сравнение ведется по всему Северному полушарию в узлах регулярной сетки данных с шагом 1 градус по широте и долготе, по полям аномалий приземного давления и температуры.

3) Производится расчет комплексного параметра сходства между каждым из классов ансамбля первого месяца прогноза и фактическими наблюдениями. Классы ранжируются по мере убывания комплексного параметра сходства (Рис.2.2).

4) Класс ансамбля для первого месяца прогноза, у которого получен максимальный комплексный параметр сходства с фактическим полем, назначается выбранным прогностическим классом на следующий прогностический месяц. Предполагается, что направление развития

макросиноптического процесса этого класса в первом месяце прогноза будет сохраняться и во втором месяце.

5) Строятся прогностические карты на второй месяц прогноза по выбранному классу.

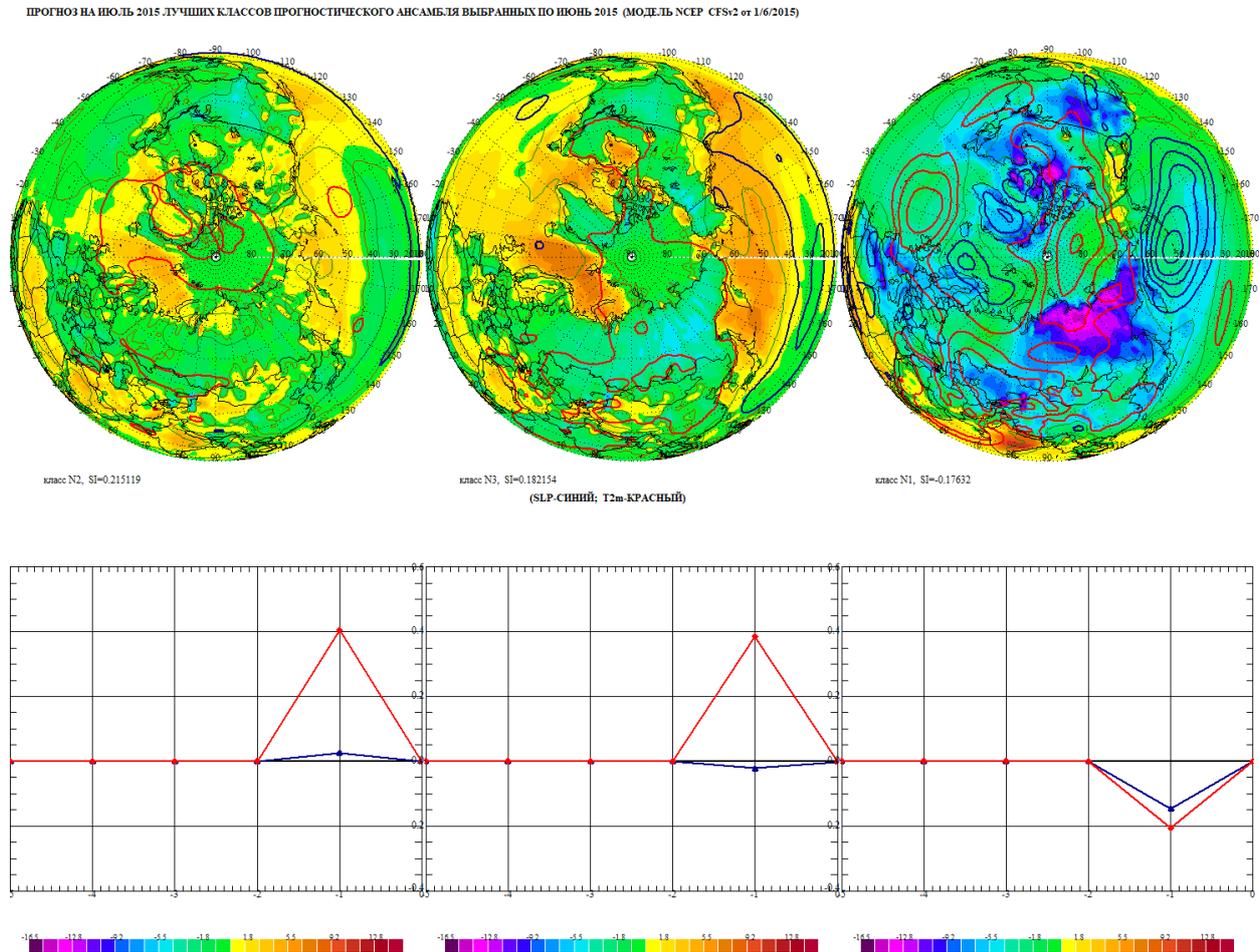


Рисунок 2.2 Карты классов прогностического ансамбля ранжированные по мере сходства с фактическими наблюдениями.

4. Оценка качества ансамблевого прогноза на второй прогностический месяц, по лучшему классу.

4.1 Постановка задачи исследования

Задача выбора сценария, по которому будет развиваться макросиноптический процесс в ближайшем месяце и есть задача долгосрочного прогноза погоды. Для решения этой проблемы на протяжении многих десятилетий были разработаны сотни различных методов. Метод ансамблевого прогноза погоды предполагает, что в рассчитанном гидродинамической моделью ансамбле возможных сценариев развития синоптических процессов представлены все основные направления развития макропроцессов. Исходя из этого предположения прогноз можно представить, как в виде среднего сценария по ансамблю, так и в виде поля вероятности осуществления того или иного сценария. Данный подход показал свою высокую эффективность, но он не применим в том случае, если развитие отдельных макропроцессов значительно отклоняется от среднего сценария развития. Тем не менее, предполагается, что в ансамбле присутствует и «истинный» сценарий развития макропроцессов в будущие месяцы. Задача классификации ансамбля, описанная выше, направлена на выделение различных направлений развития макропроцесса. Следующим шагом должен быть выбор «истинного» сценария развития из полученных классов ансамбля.

Для выявления «истинного» сценария развития предлагается использовать подходы, используемые при разработке долгосрочных прогнозов погоды синоптическим методом. Предполагается, что развитие макросиноптических процессов подчиняется определенным законам развития и не является случайным процессом. Несмотря на хаотическое состояние атмосферы, процессы, развивающиеся в ней, подчиняются влиянию принуждающих сил, действующих при реализации энергии от источников, находящихся вне атмосферы – солнечная радиация, океан, подстилающая поверхность, ледовый и снежный покровы, растительный покров и многих

других. Поскольку перечисленные источники значительно более инерционны, чем атмосферные процессы, то направление их влияния флуктуирует день ото дня, а медленно трансформирует атмосферные процессы на протяжении недель и месяцев. В связи с этим, выдвигается следующее предположение, что если нам удастся определить направление трансформации процессов, то с высокой долей вероятности (невозможно все же исключить полностью хаотическую природу атмосферы) можно предсказать к какому именно сценарию развития склонится атмосфера в будущие месяцы. Определение направления трансформации процессов можно выявить, если проанализировать историю развития макропроцессов в предшествующих, прогностическому, месяцах. При разработке синоптических прогнозов погоды исследуется предыстория развития макропроцессов в предшествующие месяцы и в качестве прогностического выбирается процесс наиболее аналогичный текущему по типу своей трансформации. Достоверные аналоги к текущему процессу можно выбрать если анализируется не только месяц, предшествующий прогностическому, но и месяцы предыстории - от 3 до 5 месяцев назад.

При анализе прогностического ансамбля, рассчитанного численной моделью, предлагается использовать схожий подход. В случае ансамбля, рассчитанного по численной модели, невозможно выявить по предшествующим прогнозу месяцам направление развития макропроцессов. При расчете всех членов ансамбля используются одни и те же фактические данные с небольшими возмущениями в них, а все предшествующие расчету месяцы сформированы из фактических наблюдений. Исходя из этого, нами было сделано допущение, что для выявления «истинного» сценария развития макропогоды необходимо использовать второй прогностический месяц ансамблевого прогноза, а первый месяц рассматривать как набор данных, по которому производится выделение классов внутри ансамбля, сравнение их с фактическими наблюдениями и определение того класса, макропогода

которого лучше всего соответствует фактической погоде. Предполагается, что дальнейшее развитие макропроцессов будет происходить по выбранному классу и прогноз погоды на месяц будет разработан с использованием прогностических полей данного класса. Для реализации предложенного метода прогноза на следующий месяц необходимо использовать только те ансамблевые прогнозы, которые были разработаны не в текущем месяце, а за один месяц до него.

Например, для прогноза погоды на июль, необходимо использовать прогноз, разработанный на позднее 1 июня. В этом случае прогностические поля ансамблевого прогноза на июнь классифицируются, все классы по очереди сравниваются с полями фактических наблюдений метеопараметров за июнь. До 30 июня выбирается лучший прогностический класс и по полям гидрометеорологических параметров этого класса разрабатывается прогноз на июль.

Основной задачей нашего исследования было определение того, по какому именно выделенному классу прогностического ансамбля необходимо составить прогноз. Данная задача крайне сложна, так как считается, что все члены ансамбля имеют равную вероятность осуществления в своем будущем развитии.

В нашем исследовании была поставлена комплексная задача:

- Выявление наиболее вероятного класса, по которому будет идти будущее развитие процессов;
- Построение по этому классу прогностических полей;
- Расчет оценок качества для этих прогнозов.

4.2 Цели исследования.

- a) Разработать ретроспективные ансамблевые прогнозы полей аномалий приземного давления и температуры на Северном полушарии на первый прогностический месяц за период с 2010 по 2018 годы по всем членам ансамбля;
- b) Разработать ретроспективные вероятностные ансамблевые прогнозы полей аномалий приземного давления и температуры на Северном полушарии на второй прогностический месяц за период с 2010 по 2018 годы по всем членам ансамбля;
- c) Провести классификацию прогностического ансамбля по первому прогностическому месяцу для всех ретроспективных прогнозов CFSR с 2010 по 2018 годы;
- d) Выбрать класс ансамбля, наиболее схожий в полях аномалий приземного давления и температуры с фактическими полями полученными по данным реанализа в первом прогностическом месяце;
- e) Разработать ретроспективный прогноз полей аномалий приземного давления и температуры на Северном полушарии на второй прогностический месяц за период с 2010 по 2018 годы по выбранному классу;
- f) Провести оценку качества прогнозов по всем трем методам для каждого календарного месяца за период с 2010 по 2018 годы;
- g) Построить средние карты пространственного распределения оценок качества на Северном полушарии;
- h) Построить графики средних оценок качества для Северного полушария по календарным месяцам и по годам;
- i) Провести анализ полученных данных и сделать выводы о применимости на практике метода прогноза по выбранному классу ансамбля.

5. Географическое распределение параметров оценок качества прогнозов по трем методам

С целью анализа распределения оценки качества ансамблевых прогнозов аномалий приземного давления и температуры по Северному полушарию, для ретроспективных прогнозов модели CFSV2, за период с 2010 по 2018 год, нами были рассчитаны три оценки качества – по параметру корреляции, RO и RMSE в каждой точке регулярной сетки прогнозной модели с шагом 1 градус по широте и долготе. Оценка качества проводилась по массиву данных в 107 значений прогнозов в каждой точке сетки, без разбиений на конкретные годы или календарные месяцы. Оценка проводилась для каждого из трех методов – прогноз по всем членам ансамбля на первый и второй месяцы и прогноз по выбранному классу. По полученным массивам данных были построены карты географического распределения, каждой из изучаемых оценок качества, по каждому из прогностических методов в отдельности.

Целью данного этапа исследований было определение тех географических районов Северного полушария, для которых прогноз аномалий приземного давления и температуры наиболее успешен. На следующем этапе исследования будет необходимо провести аналогичное исследование по каждому календарному месяцу в отдельности для того, чтобы определить, какой именно из предложенных методов, наиболее подходит для прогноза аномалий метеопараметров в каждом из них.

Результаты исследования представлены на Рис.3(а,б,в). Анализ пространственного распределения полей оценок качества прогнозов по Северному полушарию приведен ниже.

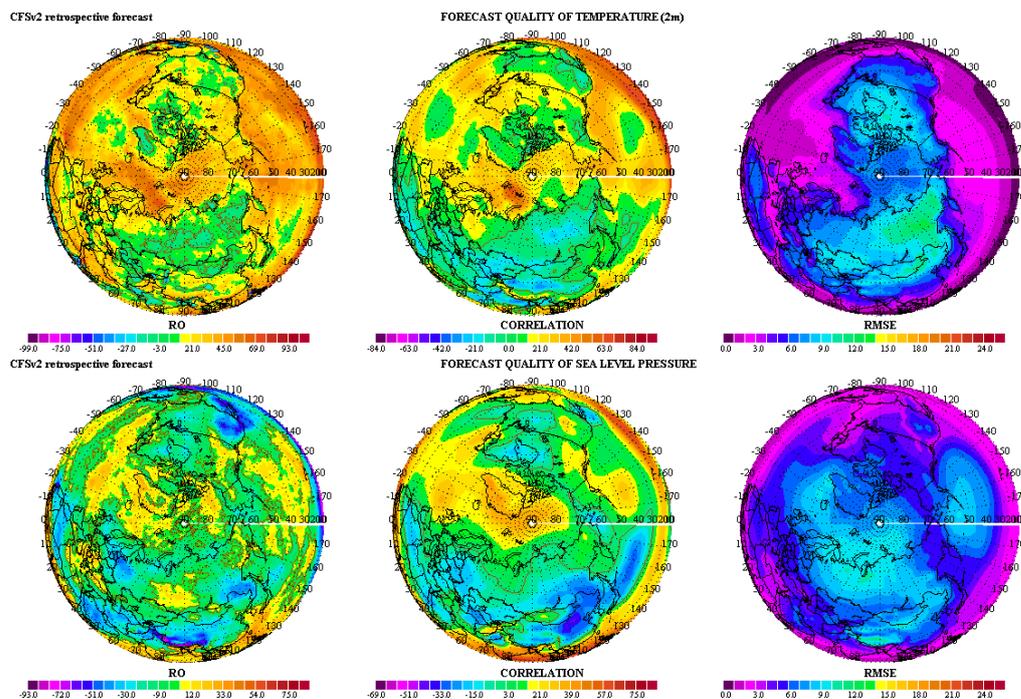


Рисунок 3а. Оценки качества прогноза по выбранному классу для второго месяца прогноза. Географическое распределение средних оценок качества прогноза RO, CORR, RMSE для приземного давления и температуры на уровне 2 метра, разработанного по модели ретроспективного прогноза CFSv2 за период с 2010 по 2018 год. Желтым и красным цветом показаны положительные значения оценок RO и CORR, синим цветом отрицательные значения, зеленым цветом – значения близкие к нулю. Значения RMSE показаны в градациях синего цвета.

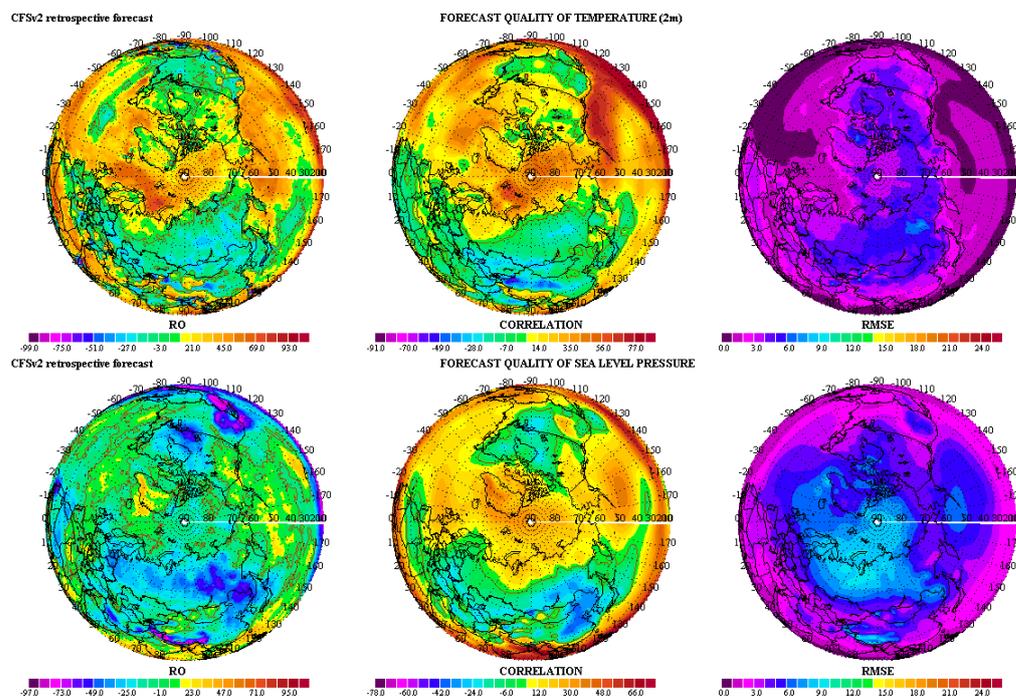


Рисунок 3б. Оценки качества по методу всех членов ансамбля для второго месяца прогноза. Географическое распределение средних оценок качества прогноза RO, CORR, RMSE для приземного давления и температуры на уровне 2 метра, разработанного по модели ретроспективного прогноза CFSv2 за период с 2010 по 2018 год. Желтым и красным цветом показаны положительные значения оценок RO и CORR, синим цветом отрицательные значения, зеленым цветом – значения близкие к нулю. Значения RMSE показаны в градациях синего цвета.

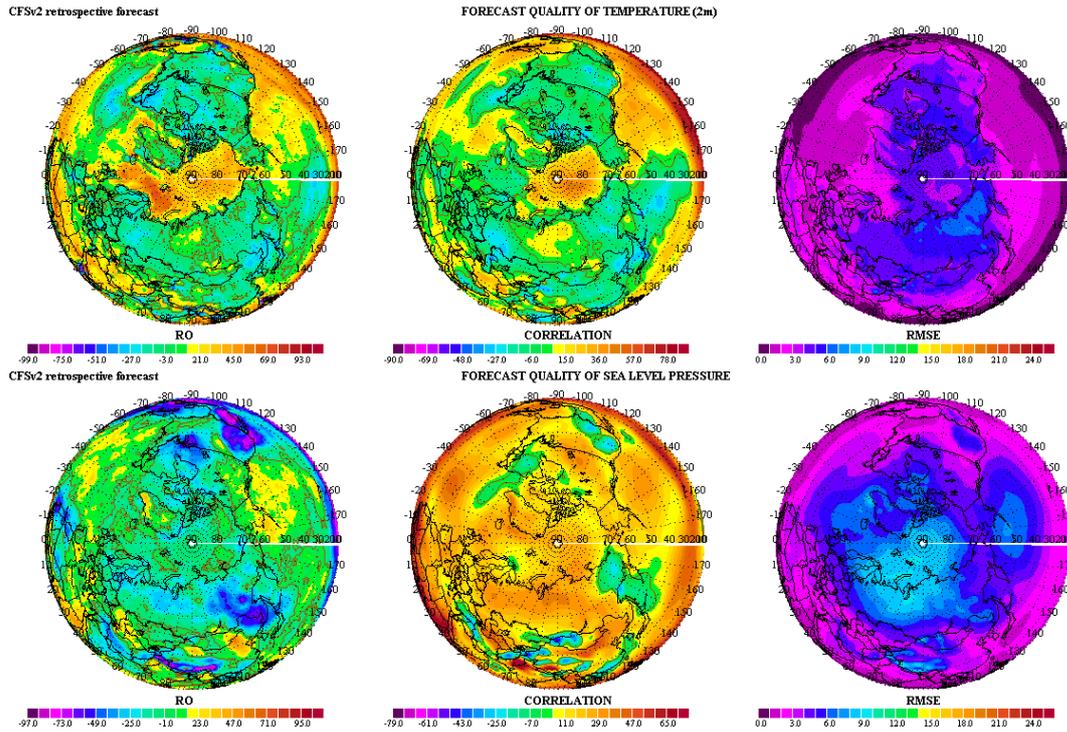


Рисунок 3в. Оценки качества по методу всех членов ансамбля для первого месяца прогноза. Географическое распределение средних оценок качества прогноза RO, CORR, RMSE для приземного давления и температуры на уровне 2 метра, разработанного по модели ретроспективного прогноза CFSv2 за период с 2010 по 2018 год. Желтым и красным цветом показаны положительные значения оценок RO и CORR, синим цветом отрицательные значения, зеленым цветом – значения близкие к нулю. Значения RMSE показаны в градациях синего цвета.

5.1 Географическое распределение оценок качества прогноза по выбранному классу для 2 месяца прогноза

5.1.1 Приземное давление.

Анализ карт параметров RO и CORR показывает, что на Северном полушарии ансамблевый ретроспективный прогноз по выбранному классу модели CFSv2 имеет наиболее высокое качество в тропических регионах, в Атлантическом и Тихом океанах и западной Арктике (RO составляет от +0,3 до +0,7). В полях оценок RO, то есть в прогнозах географического распределения полей того или иного знака аномалии приземного давления наблюдается низкий уровень качества на восточном побережье Северной Америки, Западной Африке и северной Индии (где RO составляет от -0,2 до -0,5). В умеренных широтах прогнозы имеют более низкое качество чем в тропических. При этом вся территория Российской Федерации попадает в зону прогнозов низкого качества, где оба параметра - и RO и CORR принимают значения ниже нуля. Наиболее низкое качество прогнозов наблюдается в Северо-Западном регионе РФ и Приморском и Хабаровском краях. Исключением являются район Южного Урала и Арктического побережья РФ, где значения параметров RO и CORR выше нуля.

Аналогичным образом распределено поле RMSE. Самые низкие значения среднеквадратической ошибки прогноза расположены в тропических районах и над Северной Америкой (от 0 до 4). Самые высокие значения RMSE наблюдаются над Северной Атлантикой, Арктикой, Северной частью Тихого океана и всей территорией РФ (от 6 до 10).

5.1.2 Температура воздуха на уровне 2 метра.

Оценки качества прогнозов приземной температуры воздуха распределены в пространстве практически аналогично оценкам качества прогнозов приземного давления, но с некоторыми отличиями. Область высоких оценок качества прогнозов знака аномалии температуры воздуха занимает пространство всех тропических широт за исключением только

северной Индии (RO изменяется от +0,3 до +0,6). В умеренных широтах высокое качество прогнозов знака аномалии температуры наблюдается над Тихим, Атлантическим и Арктическим океанами (RO изменяется от +0,3 до +0,6). Оценка качества RO около и ниже нуля наблюдается как над Северной Америкой (RO от 0,0 до +0,3), так в меньшей степени над Евразией. При этом, максимально высокое качество прогнозов знака аномалии над Евразией наблюдается в Северо-Западном регионе РФ (RO изменяется от +0,1 до +0,2).

Распределение в пространстве оценки качества прогноза температуры по параметру CORR аналогично распределению областей оценки параметра RO. В зону прогнозов низкого качества попадает Северная Африка и Ближний Восток.

В распределение поля оценок прогнозов приземной температуры по RMSE, в отличие от оценок прогнозов приземного давления, появляется зона высоких значений над Северной Америкой и севером Тихого океана, а над Северной Атлантикой, наоборот, RMSE становится низким и изменяется от 0,1 до 3,0.

5.2 Географическое распределение оценок качества прогноза по всем членам ансамбля для 2 месяца прогноза

5.2.1 Приземное давление.

Для данного метода прогноза область высоких оценок качества по RO в субтропиках практически исчезла, но немного расширилась в поле оценок CORR. В поле оценок RO все Северное полушарие занимают значения с отрицательным знаком параметра, кроме Северной Атлантики и Тихого океана, но и в этих районах значения параметра не превышают +0,25. Самые низкие значения от -0,2 до -0,5 располагаются на Северо-Западе РФ, Восточной Сибири, Приморья и на юго-востоке Северной Америки. Область положительных коэффициентов корреляции между фактически наблюдаемым полем давления и его прогнозом расширилась на весь Тихий, Атлантический и Арктический океаны (CORR изменяется от +0,2 до +0,5).

В сравнении с методом прогноза по выбранному классу значительно уменьшилась площадь положительных оценок прогнозов знака аномалий давления, но расширилась площадь положительных коэффициентов корреляции.

В поле оценок RMSE данного метода, в отличие от метода прогноза по выбранному классу, расширилась площадь низких значений и теперь высокие значения RMSE занимают только приполюсный район, Северо-Запад РФ, Западную Сибирь (значения от 6 до 10).

5.2.2 Температура воздуха на уровне 2 метра.

Географическое распределение полей положительных оценок параметра RO, по сравнению с методом прогноза по выбранному классу, не изменилось, но уменьшилась площадь этих полей. Область отрицательных оценок теперь охватывает всю территорию Северной Америки, кроме Аляски и востока Канады. Качество прогнозов над Евразией ухудшилось и теперь достигает значений RO от -0,1 до -0,5. При этом качество прогнозов по параметру RO стало слабо отрицательным так же и в Северо-Западном регионе РФ, в отличие от прогнозов по выбранному классу. Площадь положительных значений коэффициента корреляции расширилась при схожем географическом распределении, а величина коэффициента корреляции над Арктическим бассейном и Тихим океаном увеличилась и теперь изменяется от +0,3 до +0,7.

В поле оценок RMSE данного метода, в отличие от метода прогноза по выбранному классу, существенно расширилась область низких значений и теперь относительно высокие значения RMSE наблюдаются только над Восточной Сибирью (от 4 до 7). Таким образом, для данного метода среднеквадратическая ошибка прогнозов уменьшилась по сравнению с методом прогноза по выбранному классу, в том числе и для Северо-Запада РФ.

5.3 Географическое распределение оценок качества прогноза по всем членам ансамбля для 1 месяца прогноза

5.3.1 Приземное давление.

Для этого метода область высоких оценок качества RO в субтропиках, расширилась, по сравнению с методом прогноза по всем членам ансамбля для второго месяца, но все же осталась меньше, чем для метода прогноза по выбранному классу. Все умеренные широты Северного полушария занимает область отрицательных оценок RO, кроме Северной Атлантики и Тихого океана. В этих районах значения параметра изменяются от +0,1 до +0,3 и по площади превышают аналогичные районы положительных оценок для предыдущего метода прогноза по всем членам ансамбля для второго месяца. Самые низкие значения RO от -0,2 до -0,5 располагаются в Восточной Сибири, Приморском крае и на юго-востоке Северной Америки.

В поле оценок CORR положительные значения коэффициента корреляции распространились на Евразию и Северную Америку и оценки прогнозов по CORR являются самыми высокими из трех методов и занимают наибольшую площадь.

Таким образом, в сравнении с методом прогноза по выбранному классу и прогнозу по всем членам ансамбля по второму месяцу, данный метод имеет преимущество в оценках прогноза по CORR. Метод уступает по распределению оценок RO методу по выбранному классу, но превосходит метод по всем членам ансамбля по второму месяцу.

В поле оценок RMSE данный метод превосходит метода прогноза по выбранному классу, но уступает методу по всем членам ансамбля по второму месяцу. В нем снова расширилась площадь высоких значений и теперь высокие RMSE занимают весь Арктический район, высокие и умеренные широты Европы и Западной Сибири (от 6 до 10).

5.3.2 Температура воздуха на уровне 2 метра.

Области оценки качества прогнозов приземной температуры воздуха имеют ту же конфигурацию, что и области оценки качества прогнозов по методу выбранного класса и всем членам ансамбля для 2 месяца, но отличаются от них по занимаемой площади. Так по параметру RO положительные оценки имеют самую маленькую площадь из трех рассмотренных методов. Отрицательные значения параметра RO занимают как Евразию, так и Северную Америку, северную часть Атлантики и западную часть Тихого океана. А по параметру CORR преобладают значения около нуля в тех же районах. Площадь положительных значений по параметру CORR меньше, чем для метода прогноза по всем членам ансамбля по 2 месяцу и по выбранному классу, хотя географически распространяется на те же районы полушария. По сравнению с прогнозом по выбранному классу положительные и отрицательные значения CORR данного метода не такие высокие и изменяются от -0,25 до +0,25.

По полю оценок прогнозов приземной температуры по RMSE, данный метод лучше метода по выбранному классу, но хуже метода прогноза по всем членам ансамбля 2 месяца. Отличие от метода прогноза по всем членам ансамбля 2 месяца составляет более крупная зона относительно высоких значений RMSE над Арктическим бассейном и Восточной Сибирью.

Таким образом, по прогнозам приземной температуры воздуха данный метод имеет преимущество только в поле оценок корреляции, а по остальным оценкам занимает среднее положение из трех методов.

б. Анализ сравнения оценок качества ретроспективного прогноза CFSv2 за период с 2010-2018 год по трем методам.

6.1 Оценка качества ансамблевого прогноза приземного давления по модели NCEP ретроспективного прогноза CFSv2 за период с 2010-2018 год

6.1.1 Сезонные особенности оценок качества прогнозов по трем методам.

В приложении А представлены графики оценок качества прогнозов аномалий приземного давления по календарным месяцам.

1) Оценка качества прогнозов по параметру «RO»

Оценка качества прогноза на второй месяц по выбранному классу:

В течение года оценка RO значительно изменяется от месяца к месяцу. С января по март RO возрастает и достигает своего максимума (0,093), в апреле наблюдается понижение значений параметра, а затем RO снижается и переходит через ноль, продолжая уменьшаться, оставаясь в зоне отрицательных значений до сентября. Минимальное значение наблюдается в сентябре (-0,193), после чего RO идет на повышение оставаясь отрицательным.

Оценка качества прогноза на второй месяц по всем членам ансамбля:

Оценка прогноза по RO для 2 месяца всего ансамбля так же нестабильна, но при этом принимает только отрицательные значения с максимумом в феврале (-,005) и минимумом в ноябре (-0,198).

Оценка качества прогноза на первый месяц по всем членам ансамбля:

На графике (Рис.1.) наблюдается похожая тенденция, как и для прогноза для 2 месяца по всему ансамблю с небольшими различиями. Параметр принимает единственное положительное значение в мае, оно же является и максимальным (0,017), минимум находится так же в ноябре (-0,186).

По данному графику (Рис.1.) видно, что по параметру RO оценка качества прогноза по выбранному классу для 2 месяца прогноза имеет преимущество над другими оценками. Прогноз был самым успешным в январе, феврале, марте, апреле и мае и значения параметра были положительны. Хуже всего качество прогноза, выпущенного по всем членам ансамбля на второй прогностический месяц.

2) Качество прогнозов, по коэффициенту корреляции «CORR»

Оценка качества прогноза на второй месяц по выбранному классу:

Оценка CORR изменяется от месяца к месяцу возрастая с января по февраль и достигая своего максимума (0,154), далее наблюдается понижение параметра. В апреле CORR переходит через ноль, но в мае параметр снова поднимается выше нуля. В Июне корреляция падает ниже ноля и достигает минимального значения (-0,166) в июле. После этого корреляция флуктуирует, оставаясь в отрицательной области.

Оценка качества прогноза на второй месяц по всем членам ансамбля:

Оценка CORR принимает свое максимальное значение в январе (0,097), а в марте параметр пересекает ноль и становится отрицательным, колеблясь от месяца к месяцу. В августе CORR снова поднялась выше ноля, но в сентябре вернулась в минус. Минимальное значение CORR наблюдалось в ноябре (-0,207).

Оценка качества прогноза на первый месяц по всем членам ансамбля:

Оценка CORR по-прежнему достигает максимального значения в январе (0,106). В мае и августе параметр положителен, а во все остальные месяцы отрицателен. Минимум наблюдается в ноябре (-0,200).

По параметру CORR (Рис.2.) прогноз был успешней всего для метода выбранного класса. Прогноз был самым успешным в январе, феврале, марте и

мае. Хуже всего качество прогноза, выпущенного по всем членам ансамбля на второй прогностический месяц.

3) Качество прогнозов, определяемое среднеквадратической ошибкой прогноза «RMSE»

Оценка качества прогноза на второй месяц по выбранному классу:

Внутригодовой ход параметра RMSE схож для всех методов. Однако максимальных значений достигает RMSE для метода прогноза по выбранному классу. В январе и феврале RMSE колеблется в интервале значений 6-7, в марте достигает своего максимума (7,638), а минимальные значения принимает в июне (3,434).

Оценка качества прогноза на второй месяц по всем членам ансамбля:

Оценка RMSE ведет себя аналогично предшествующему методу, но с меньшими значениями. Пик наблюдается в марте (6,690), а минимум в августе (3,220).

Оценка качества прогноза на первый месяц по всем членам ансамбля:

RMSE незначительно колеблется в период с апреля по октябрь. Минимальное значение зафиксировано в мае (3,327), а максимальное в декабре (6,528).

Ошибка прогноза из всех методов была минимальной у прогноза по всем членам ансамбля для 2 месяца. Самые высокие значения RMSE в прогнозе по выбранному классу (Рис.3).

6.1.2 Межгодовая изменчивость оценок качества

В приложении Б представлены осредненные по годам оценки прогнозов приземного давления по трем методам. Оценка прогнозов проводилась за период с 2010 по 2018г

1) Сравнение оценок качества прогнозов аномалии приземного давления по параметру «RO»

Оценка качества прогноза на второй месяц по выбранному классу ансамбля:

Параметр RO положителен только в 2010 году и (+0,217). В 2011г он опускается ниже нуля и продолжает уменьшаться до 2013 года. С 2013г до 2015г RO незначительно увеличивается, после чего снова уменьшается до своего минимума в 2018 году (-0,163).

Оценка качества прогноза на второй месяц по всем членам ансамбля:

Минимальное значение RO наблюдалось для 2017 года (-0,256), а максимальное для 2010 года (+0,277).

Оценка качества прогноза на первый прогностический месяц по всем членам ансамбля:

Для этого метода минимум RO наблюдался в 2017 году (-0,249), а максимум в 2010 году (+0,213).

Качество прогнозов на первый прогностический месяц по всем членам ансамбля выше, чем на второй месяц, но ниже, чем качество прогноза по выбранному классу. Наибольшая успешность прогнозов наблюдается для метода прогнозов по выбранному классу. Оценки по этому методу выше оценок по другим методам в 2011г, 2012г, 2013г, 2015г, 2016г и 2017г. Худшие результаты наблюдались для метода прогнозов на второй месяц по всем членам ансамбля. (Рис.1.)

2) Сравнение оценок качества прогнозов аномалии приземного давления по коэффициенту корреляции «CORR».

Оценка качества прогноза на второй месяц по выбранному классу:

Параметр CORR достигает своего максимума в 2010 году (+0,210). Начиная с 2011 года CORR несущественно изменяется от года к году, оставаясь в основном отрицательным. В 2012 и 2016 году CORR положителен. Минимальное значение CORR наблюдается в 2018 году (-0,195).

Оценка качества прогноза на второй месяц по всем членам ансамбля:

Для этого метода максимум CORR наблюдался в 2010 году (+0,337). С 2011 года CORR отрицателен с минимумом в 2018 году (-0,278).

Оценка качества прогноза на первый прогностический месяц по всем членам ансамбля:

Для этого метода максимум наблюдался в 2010 году (+0,314), а минимум в 2017 году (-0,237).

Наибольшая успешность прогнозов по CORR наблюдается для метода прогноза по выбранному классу. Она выше оценок других методов в 2011, 2012, 2015, 2016 и 2017 годах. Худшие показатели у метода прогнозов на второй месяца составленных по всем членам ансамбля. (Рис.2.)

3) Сравнение оценок качества прогнозов аномалии приземного давления по среднеквадратической ошибке прогноза «RMSE».

Оценка качества прогноза по методу выбранного класса:

Для данного метода RMSE практически всегда колеблется в интервале значений от 5 до 6. В 2011 году RMSE выходит из интервала и достигает максимума (6,169), а в 2012 году минимума (4,868).

Оценка качества прогноза по всем членам ансамбля на второй месяц:

RMSE ведет себя нестабильно, но абсолютные величины параметра стали меньше. Минимум зафиксирован в 2010 году (3,790), а максимум в 2011 году (5,561).

Оценка качества прогноза по всем членам ансамбля на первый месяц:

Минимальное значение RMSE наблюдалось для 2010 года (3,879), а максимальное для 2011 года (5,483). Далее RMSE изменялось в диапазоне от 4 до 5.

RMSE минимальна для метода прогнозов по всем членам ансамблю для первого месяца. Максимальные RMSE наблюдаются для метода прогноза по выбранному классу. (Рис.3.)

6.2 Оценка качества ансамблевого прогноза приземной температуры по модели NCEP ретроспективного прогноза CFSv2 за период с 2010-2018 год

6.2.1 Сезонные особенности оценок качества прогнозов по трем методам.

В приложении В представлены результаты графиков оценок качества прогнозов температуры на уровне 2 метра по календарным месяцам

1) Оценка качества прогнозов аномалии приземной температуры по параметру «RO»

Оценка качества по методу прогноза выбранного класса:

Параметр RO постепенно уменьшается, начиная с января месяца. В апреле он достигает минимума (-0,174). Далее RO растет и к маю становится положительным. Начиная с июля RO непрерывно растет и достигает своего максимума в сентябре и октябре (0,532). В ноябре и октября RO снижается.

Оценка качества по методу прогноза на второй месяц по всем членам ансамбля:

RO постепенно уменьшается с января месяца, но происходит это более плавно, чем в первом случае и в апреле достигает минимума (-0,043). С июля RO растет непрерывно до октября, достигая максимума (0,500). Далее RO незначительно уменьшается.

Оценка качества по методу прогноза на первый месяц по всем членам ансамбля:

RO ведет себя противоположено первым двум методам. Начиная с января, RO постепенно растет и достигает максимума в мае (0,400). Далее RO уменьшается, перейдя через нуль в августе и достигнув минимума в сентябре (-0,330), после чего RO снова растет.

По параметру RO метод прогноза по выбранному классу является лучшим. Прогноз в соответствии с оценкой RO был лучшим из трех методов в июне, июле, августе, сентябре, октябре и ноябре. Худшие результаты наблюдались для метода прогноза по всем членам ансамбля для первого месяца. (Рис.1.)

2) Оценка качества прогнозов аномалии приземной температуры по коэффициенту корреляции «CORR».

Оценка качества по методу прогноза выбранного класса:

CORR достигает максимального значения в феврале (0,298), а далее непрерывно уменьшается и достигает своего минимума в мае (-0,015). После этого CORR растет до октября и затем снова уменьшается.

Оценка качества по методу прогноза по всем членам ансамбля на второй месяц:

CORR растет с января до марта, а затем падает. При этом в мае наблюдается минимум (0,007). Далее CORR растет и достигает максимума в октябре (0,450).

Оценка качества по методу прогноза по всем членам ансамбля на первый месяц:

Для этого метода максимальное значение CORR наблюдалось марте (0,414). В мае и сентябре (-0,047) наблюдаются минимумы. Затем CORR снова становится положительным.

Метод прогноза по всем членам ансамблю для второго месяца прогноза имеет преимущество над остальными. CORR в течение года положительна и показывает лучшие показатели среди трех месяцев в январе, феврале, мае и октябре. Наименьшая успешность у метода прогноза по всем членам ансамбля на первый прогностический месяц. Значения CORR для этого месяца чаще всего отрицательные. (Рис.2.)

3) Оценка качество прогнозов аномалии приземной температуры, по среднеквадратической ошибке «RMSE».

Оценка качества по методу прогноза выбранного класса:

Для этого метода с января до апреля RMSE растет, а затем непрерывно снижается вплоть до своего минимума в августе (1,972). В октябре RMSE резко выросла и достигла максимума в ноябре (8,146).

Оценка качества по методу прогноза по всем членам ансамбля на второй месяц:

Для этого метода RMSE показывает два пика в ноябре и декабре, с максимумом в ноябре (4,304). В остальных календарных месяцах значения не превышают 3. Минимальное значение RMSE наблюдалось в августе (1,697).

Оценка качества по методу прогноза по всем членам ансамбля на первый месяц:

RMSE растет с января до своего максимума в апреле (4,101), а затем уменьшается до минимума в июне (2,162). Далее отмечается непрерывный рост до сентября, а затем снова уменьшение.

Метод прогноза по всем членам ансамбля для второго месяца имеет наиболее низкие значения RMSE в январе, феврале, марте, апреле, мае, июле, августе, сентябре, октябре. Наиболее высокие значения RMSE отмечаются для метода прогноза по выбранному классу. (Рис.3.)

6.2.2 Межгодовая изменчивость оценок качества

1) Сравнение оценок качества прогнозов аномалии температуры на уровне 2 метра по параметру «RO»

В приложении Г представлены осредненные по годам оценки прогнозов температуры на уровне 2 метра для трех методов. Оценка прогнозов проводилась за период с 2010 по 2018г

Оценка качества по методу прогноза выбранного класса:

Параметр RO положителен во все прогностические годы. В 2010 году наблюдались минимальные оценки за весь период (0,160). Далее RO постепенно увеличивается, достигая пика в 2016 году (0,389), после этого опять снижается уменьшается.

Оценка качества по методу прогноза на второй месяц по всем членам ансамбля:

Поведение параметра RO аналогично первому методу. Параметр всегда положительный. Начиная с 2010 года RO снижается до минимального значения в 2012 году (0,134) и плавно увеличивается до максимума в 2017 году (0,317). В 2018 году RO идет на спад.

Оценка качества по методу прогноза на первый месяц по всем членам ансамбля:

RO положителен во всех изучаемых годах. С 2010 года RO снижается, а в 2013 году достигает минимума (0,043). Далее до 2016 года RO растет и достигает максимума (0,246) и после идет на спад.

Метод прогноза по выбранному классу имеет лучшие оценки за весь период, кроме 2010 года. Ниже всего качество метода прогноза по всем членам ансамбля на первый прогностический месяц. (Рис.1.)

2) Сравнение оценок качества прогнозов аномалии температуры на уровне 2 метра по коэффициенту корреляции «CORR»

Оценка качества по методу прогноза выбранного класса:

CORR положительна за весь исследуемый период. Значения находятся в промежутке от 0,100 до 0,200 с максимумом в 2016 году (0,316) и минимумом в 2013 году (0,087).

Оценка качества по методу прогноза на второй месяц по всем членам ансамбля:

CORR положительна в 2010 году, далее резко уменьшается и переходит через ноль в 2011 году. Минимум CORR наблюдается в 2018 году (-0,278), а максимум в 2010 году (0,337).

Оценка качества по методу прогноза на первый месяц по всем членам ансамбля:

В течении всего периода CORR, достигает максимума в 2010 году (0,240). Далее значения колеблются в промежутке от 0,100 до 0,200. Минимум CORR наблюдается в 2018 году (0,070).

По параметру CORR лучшим методом является прогноз по всем членам ансамбля на 1 месяц, который имеет максимальные из трех методов значения в 2011, 2012, 2013, 2014 и 2015 годах. Худшим из методов по CORR оказался

прогноз по всем членам ансамбля для 2 месяца. Для него практически за весь период значения отрицательные. (Рис.2.)

3) Сравнение оценок качества прогнозов аномалии температуры на уровне 2 метра по среднеквадратической ошибке «RMSE»

Оценка качества по методу прогноза выбранного класса:

Максимальное RMSE наблюдалось в 2017 году (5,794), а минимальное в 2016 (4,319).

Оценка качества по методу прогноза на второй месяц по всем членам ансамбля:

Максимальное значение RMSE наблюдалось в 2011 году (5,561), а минимальное в 2010 году (3,790).

Оценка качества по методу прогноза на первый месяц по всем членам ансамбля:

Минимальное значение RMSE наблюдалось в 2011 году (2,988), а максимальное в 2018 году (3,518).

Метод прогноза по всему ансамблю для первого месяца имеет минимальные значения RMSE за весь исследуемый период. Самые высокие значения среднеквадратической ошибки выявлены для метода прогноза по всем членам ансамбля для второго месяца. (Рис.3.)

7. Выводы, полученные из анализа результатов.

В исследовании были рассмотрены три метода составления прогнозов аномалий приземного давления и температуры с использованием различного набора членов одного и того же прогностического ансамбля.

Были разработаны и оценены прогнозы в которых:

I. Была проведена классификация членов прогностического ансамбля по первому методу прогноза, выбранные классы сравнивались с фактическими наблюдениями и лучший класс (набор выбранных, однородных членов ансамбля) был использован для разработки прогноза на второй прогностический месяц;

II. Был так же разработан прогноз на второй прогностический месяц по всему набору членов ансамбля;

III. В качестве контрольного так же был разработан прогноз по всему набору членов прогностического ансамбля на первый прогностический месяц.

Все три прогностических поля были оценены с использованием данных реанализа и получены оценки качества. На основании полученных результатов был сделан вывод о возможном применении метода прогноза по лучшему прогностическому классу.

7.1 Географическое распределение оценок качества прогнозов

Анализ географического распределения оценок качества прогнозов на Северном полушарии показывает, что ансамблевый ретроспективный прогноз аномалий приземного давления по модели CFSv2 имеет наиболее высокое качество прогнозов в тропических регионах. В умеренных широтах прогнозы имеют более низкое качество чем в тропических. При этом вся территория Российской Федерации попадает в зону прогнозов низкого качества.

Область высоких оценок качества прогнозов знака аномалии температуры воздуха практически полностью занимает пространство тропических широт. В умеренных широтах высокое качество прогнозов знака аномалии температуры наблюдается над Тихим, Атлантическим и Арктическим океанами. При этом, максимально высокое качество прогнозов знака аномалии над Евразией наблюдается в Северо-Западном регионе РФ.

В сравнении с методом прогноза по выбранному классу, в методе прогноза по всем членам ансамбля на второй прогностический месяц значительно уменьшилась площадь положительных оценок прогнозов знака аномалий давления, но расширилась площадь положительных коэффициентов корреляции на океанские регионы, но сократилась для континентов. Важно подчеркнуть, что в этом методе прогноз ухудшилось качество прогнозов аномалий приземного давления по территории Северо-Западного региона РФ. Для прогнозов аномалий приземной температуры уменьшилась площадь положительных оценок, а области отрицательных оценок качества теперь охватывают и Северную Америку, в отличие от метода прогноза по выбранному классу, для которого на этой территории располагаются области положительных оценок качества.

В качестве положительной стороны, в методе по всем членам прогностического ансамбля уменьшилась величина среднеквадратической ошибки как в полях приземного давления, так и температуры.

Метод прогноза полей аномалий приземного давления и температуры, используемый как тестовый – по всем членам ансамбля для первого прогностического месяца, показал результаты оценок ниже, чем метод по выбранному классу на второй прогностический месяц. Все районы умеренных широт попали в область отрицательных оценок качества и уменьшилась величина оценок по RO. Зато данный метод позволяет неплохо прогнозировать величину аномалии приземного давления и температуры на континентах. Кроме того, уменьшилась среднеквадратическая ошибка

прогноза аномалий давления и температуры по сравнению с прогнозами по выбранному классу. По сравнению с прогнозами по всем членам ансамбля на второй прогностический месяц этот метод преимущества не имеет.

Таким образом, по прогнозам приземной температуры воздуха данный метод имеет преимущество только в поле оценок корреляции, а по остальным оценкам занимает среднее положение из трех методов.

Метод прогноза по выбранному классу в среднем имеет преимущество над другими двумя методами, но необходимо отметить, что в целом ансамблевый ретроспективный прогноз аномалий приземного давления и температуры по модели CFSv2 имеет низкую успешность для умеренных широт Евразии и улучшение получаемое при использовании метода по выбранному классу относится только к Арктическому бассейну и Северо-Западу РФ (последний район только в поле аномалий приземной температуры).

7.2 Средние значения качества прогнозов для Северного полушария, без учета календарных особенностей.

Результат анализа средних, по Северному полушарию, оценок качества трех методов прогнозов позволил выявить область использования каждого из методов.

1) Метод прогноза по выбранному классу для второго месяца по всему Северному полушарию предпочтительно использовать для прогноза пространственного распределения того или иного знака поля температуры на уровне 2 метра.

2) Метод прогноза по всем членам ансамбля для второго месяца по всему Северному полушарию предпочтительно использовать для прогноза пространственного распределения поля того или иного знака приземного давления и прогноза абсолютных значений поля приземного давления.

3) Метод прогноза по всем членам ансамбля для первого месяца по всему Северному полушарию показал наихудшие оценки качества, как для прогноза поля приземного давления, так и прогноза полей аномалий температуры на уровне 2 метра.

7.3 Сезонные и межгодовые особенности использования ретроспективных ансамблевых прогнозов модели CFSv2 по трем методам.

В исследовании были рассмотрены календарные особенности каждого метода прогноза и качество этих методов по годам исследуемого ряда.

- 1) В сравнении с методом по всем членам ансамбля по второму месяцу и прогнозу по всем членам ансамбля по первому месяцу, метод по выбранному классу имеет преимущество при прогнозе знака аномалии по приземному давлению. Если оценивать прогноз давления по месяцам, то прогноз успешен в январе, феврале, марте, апреле и мае, а по годам 2011, 2012, 2013, 2015, 2016 и 2017 годах.
- 2) Метод выбранного класса, хотя и уступает в качестве прогноза величины аномалии приземного давления методу прогноза по всем членам ансамбля по первому месяцу, но превосходит метод по всем членам ансамбля по второму месяцу. В месячном и годовом ходе метод выбранному классу предпочтительней использовать в январе, феврале, марте и мае. Лучшие годы, для которых составлялся прогноз были 2011, 2012, 2015, 2016 и 2017.
- 3) По среднеквадратической ошибке прогноза метод по выбранному классу несомненно уступает двум другим месяцам при прогнозе аномалий приземного давления и температуры во внетропических районах Евразии. Но вполне конкурентоспособен в тропических районах и над Северной Америкой.

Список литературы

1. Руководящие указания по системам ансамблевого прогнозирования и прогнозированию. Всемирная метеорологическая организация. [Текст]: Дос. ВМО-№ 1091- 2012. - М.: Издание, 2012. - 24 с.

2. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования, 2005: ТОМ I. (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО). Глобальные аспекты. Издание 1992 г. ВМО-№ 485. Добавление II.8. Стандартная система проверки оправдываемости (ССПО) долгосрочных прогнозов (ДП). Секретариат Всемирной Метеорологической Организации — Женева — Швейцария. 173 с.

3.РД52.27.284-91Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов .- Л.: Гидрометеоиздат, 1991.- 150 с.

4. Piero A. Chessa Clficcification and validation of the ECMWF EPS pertubered forecasts using pre-defined weather regimes. Technical memorandum 317. ECMWF, reading, Berkshire, England, October 2000. P30

5. Suranjana Saha, Shrinivas Moorthi, Xingren Wu, Jiande Wang, Sudhir Nadiga, Patrick Tripp, Hua-Lu Pan, David Behringer, Yu-Tai Hou, Hui-ya Chuang, Mark Iredell, Michael Ek, Jesse Meng, Rongqian Yang, 2011 : The NCEP Climate Forecast System Version 2. To be submitted to the Journal of Climate.

6. Астахова Е.Д. Алферов Ю.В. Опыт использования параллельных алгоритмов в спектральной модели среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России.2007.Т.8.С. 138-146.

7. Астахова Е.Д., Алфёров Ю.В. Организация задачи численного среднесрочного прогноза погоды на многопроцессорных системах.,2006.

8. Руководство по работе с программой долгосрочного прогноза погоды «AFRICA 12.0».

9. Киктев Д.Е., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Муравьев А.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Мирвис В.М., Мелешко В.П., Матгин В.А., Львова Т.Ю., 2011: Совместные испытания технологий глобального сезонного прогноза на основе моделей Гидрометцентра России и ГГО. 72 Информационный сборник №38. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под редакцией к.г.н. Г.К.Веселовой, Москва, Обнинск, ИГ – СОЦИН, с.4-13.

10. Ансамблевый гидродинамический прогноз погоды и высокопроизводительные вычисления. Е. Д. Астахова — в.н.с., канд. физ.-мат. наук, с.н.с., ГУ «Гидрометцентр России», Ю. В. Алферов — ст. научн. сотрудник, канд. физ.-мат. наук, ГУ «Гидрометцентр России».

Приложение А

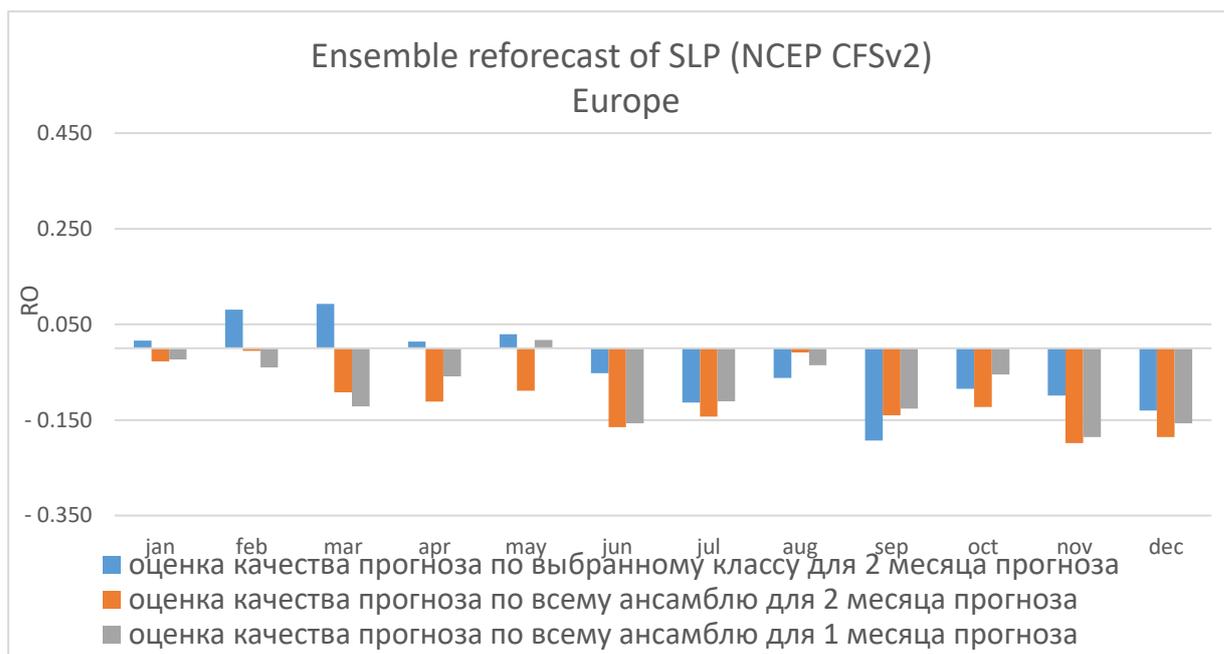


Рис. 1. Ансамблевый прогноз по давлению параметра RO по календарным месяцам

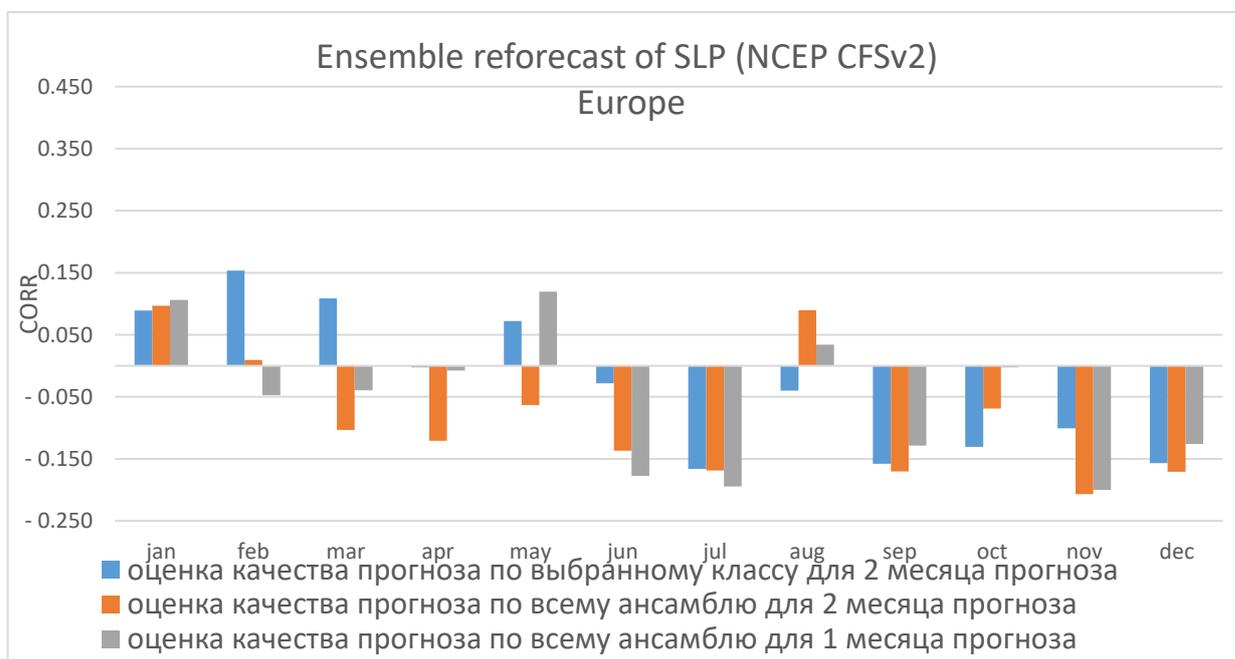


Рис. 2. Ансамблевый прогноз по давлению параметра CORR по календарным месяцам

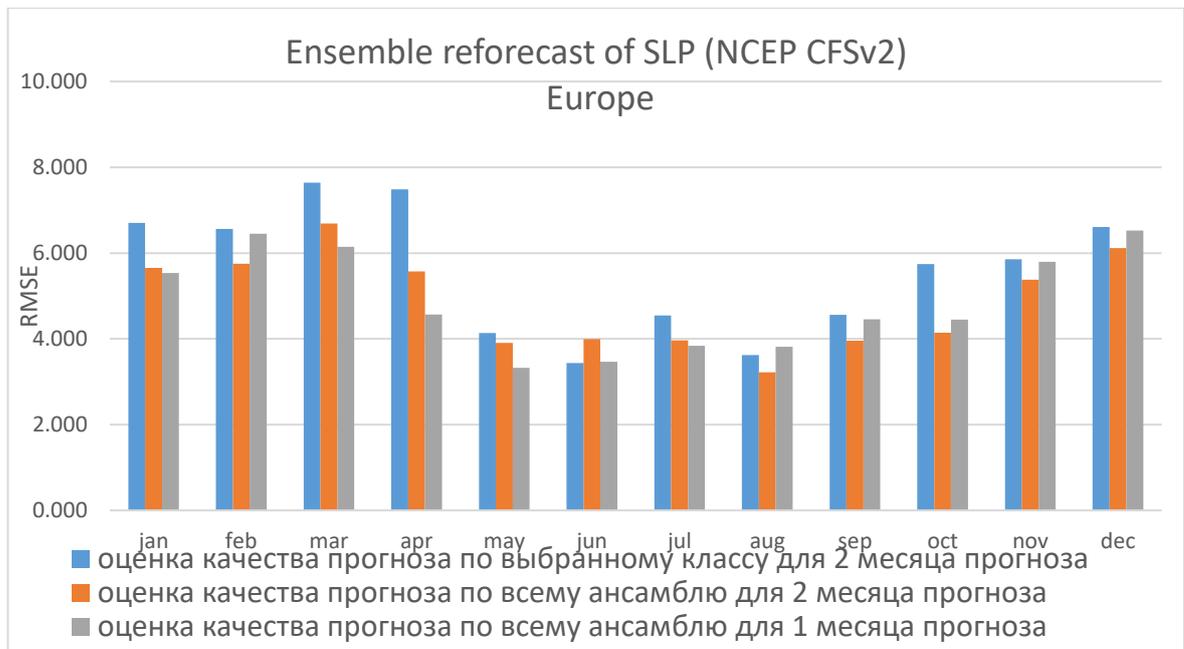


Рис.3. Ансамблевый прогноз по давлению параметра RMSE по календарным месяцам

Приложение Б

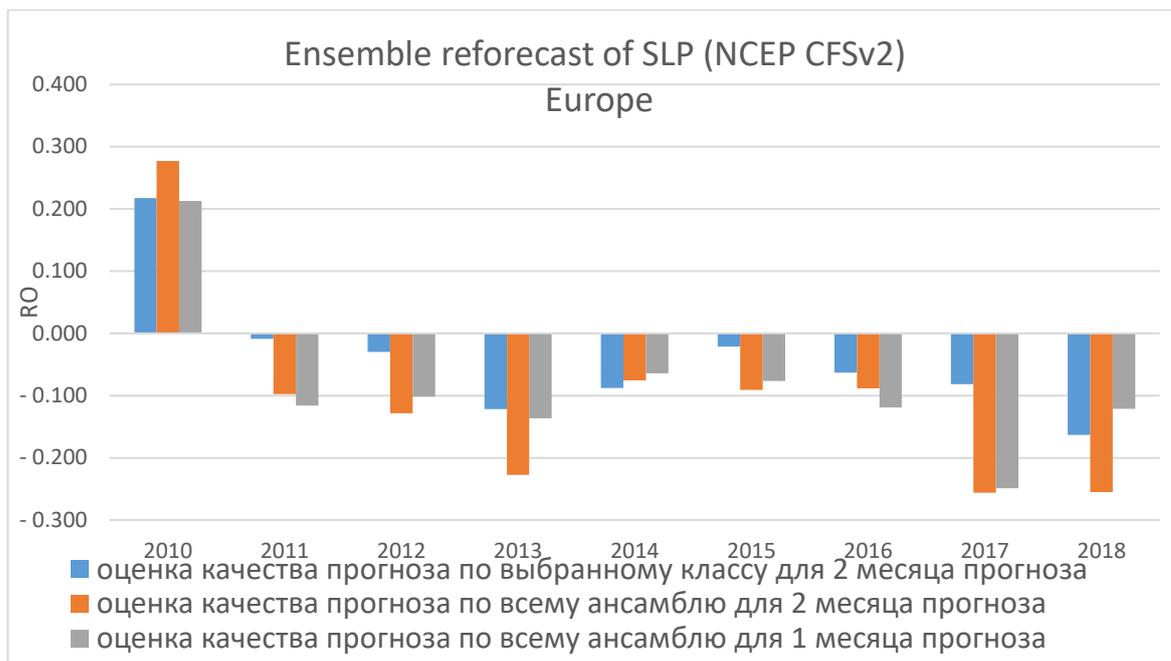


Рис. 1. Ансамблевый прогноз по давлению параметра RO по годам

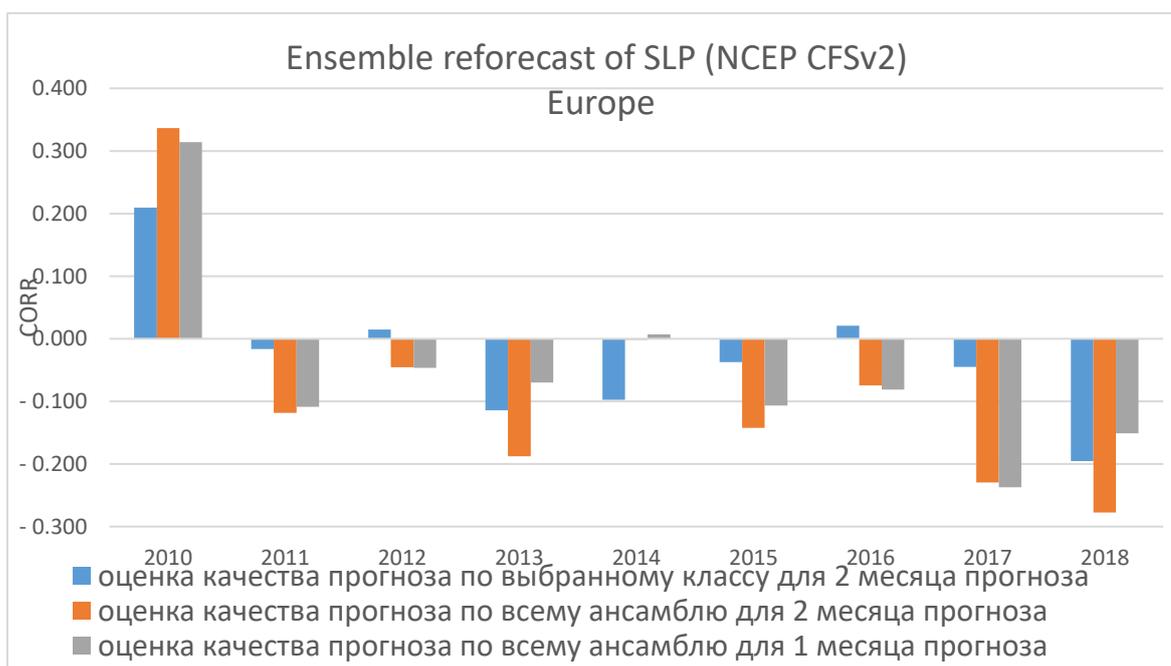


Рис. 2. Ансамблевый прогноз по давлению параметра CORR по годам

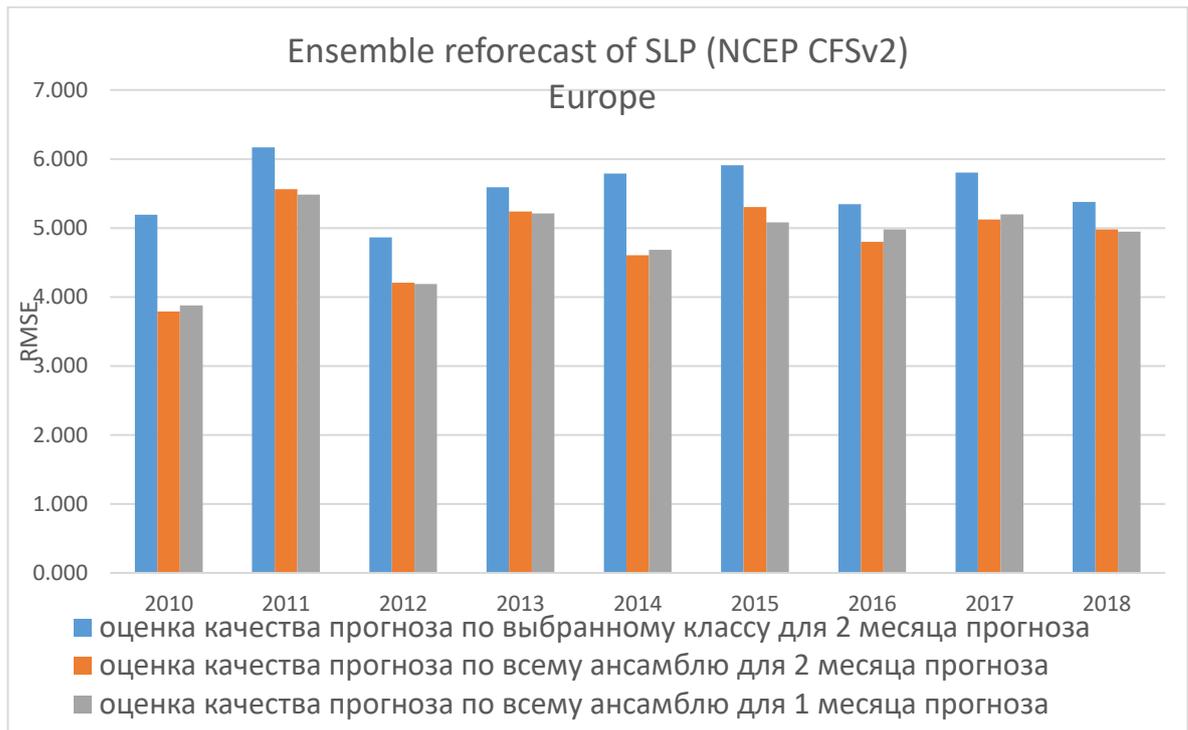


Рис. 3. Ансамблевый прогноз по давлению параметра RMSE по годам

Приложение В

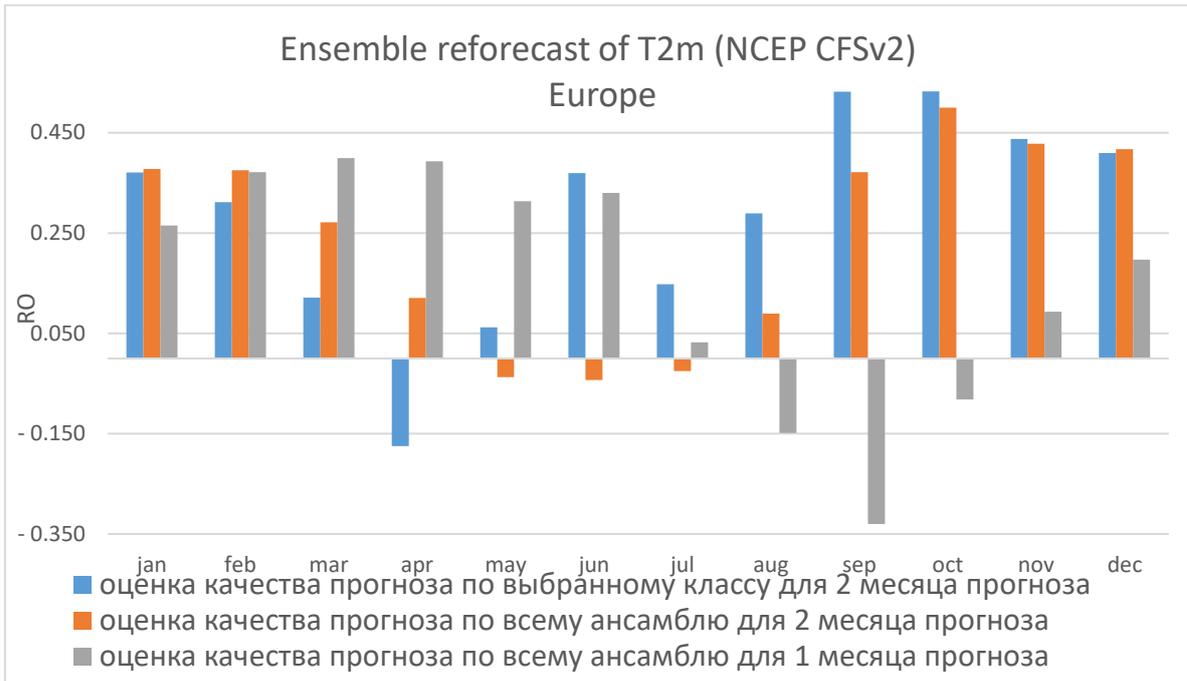


Рис. 1. Ансамблевый прогноз по температуре параметра RO по календарным месяцам

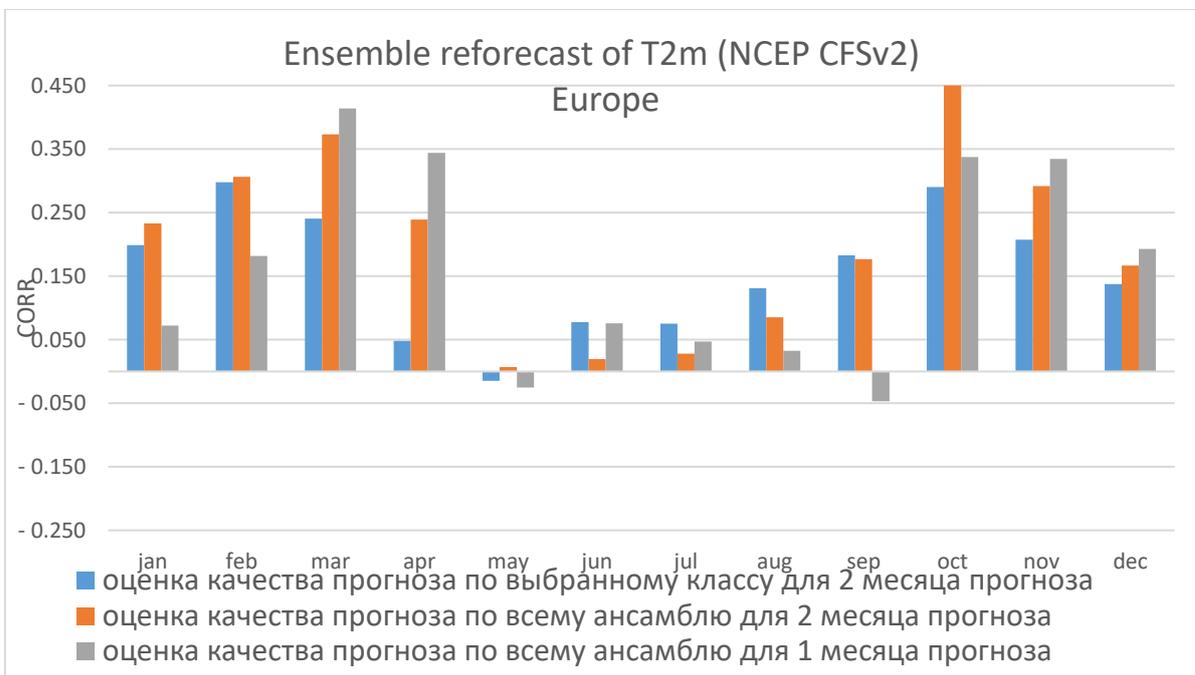


Рис. 2. Ансамблевый прогноз по температуре параметра CORR по календарным месяцам

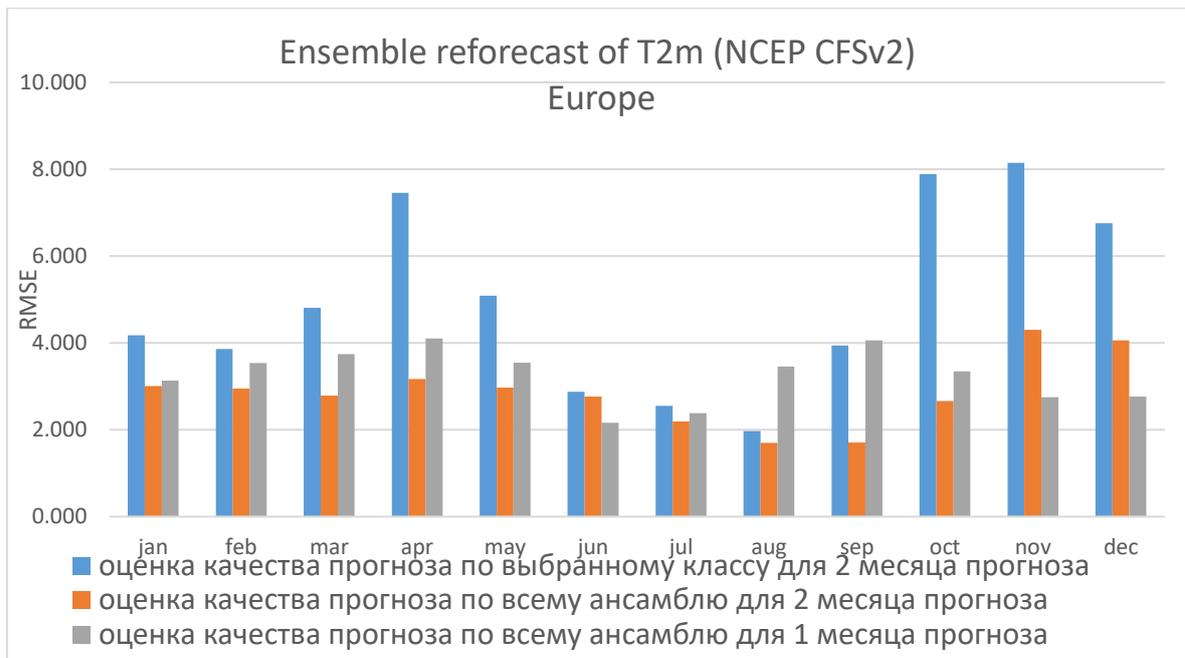


Рис. 3. Ансамблевый прогноз по температуре параметра RMSE по календарным месяцам

Приложение Г

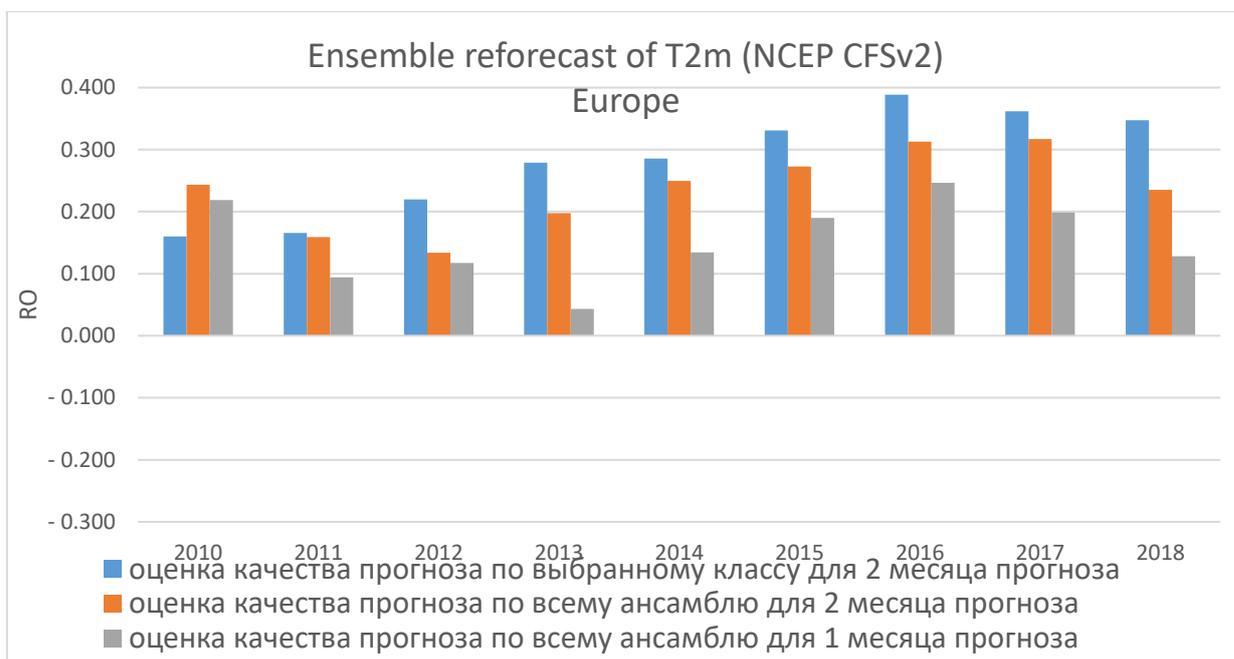


Рис. 1. Ансамблевый прогноз по температуре параметра RO по годам

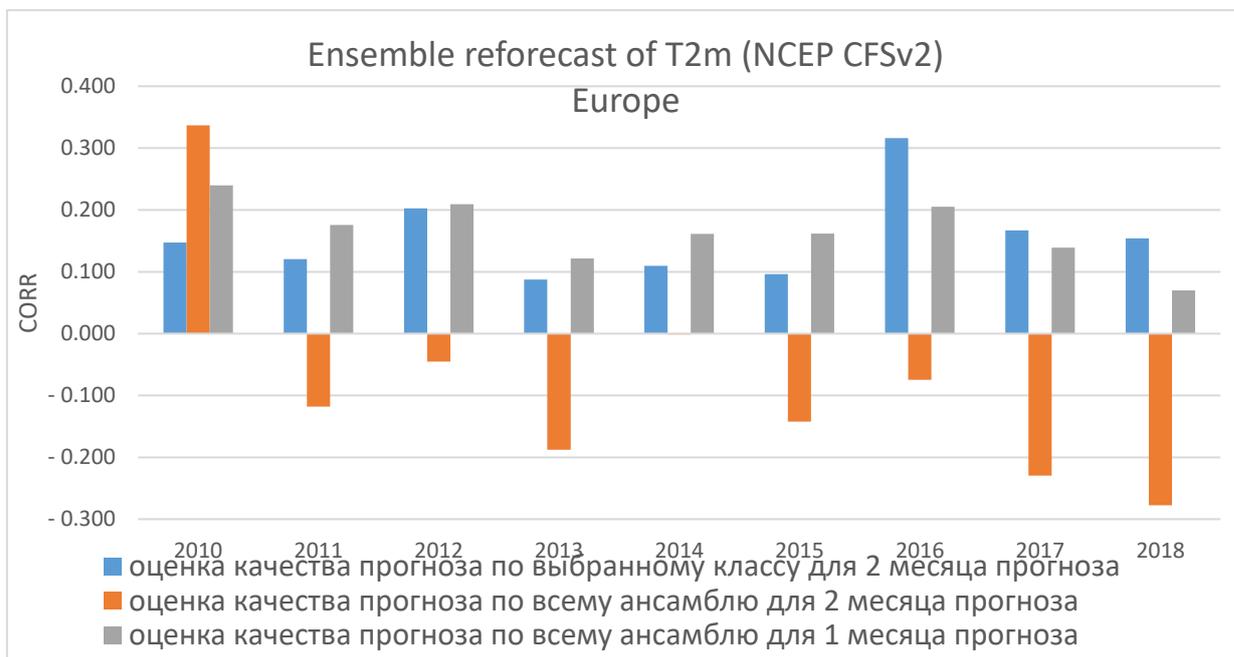


Рис. 2. Ансамблевый прогноз по температуре параметра CORR по годам

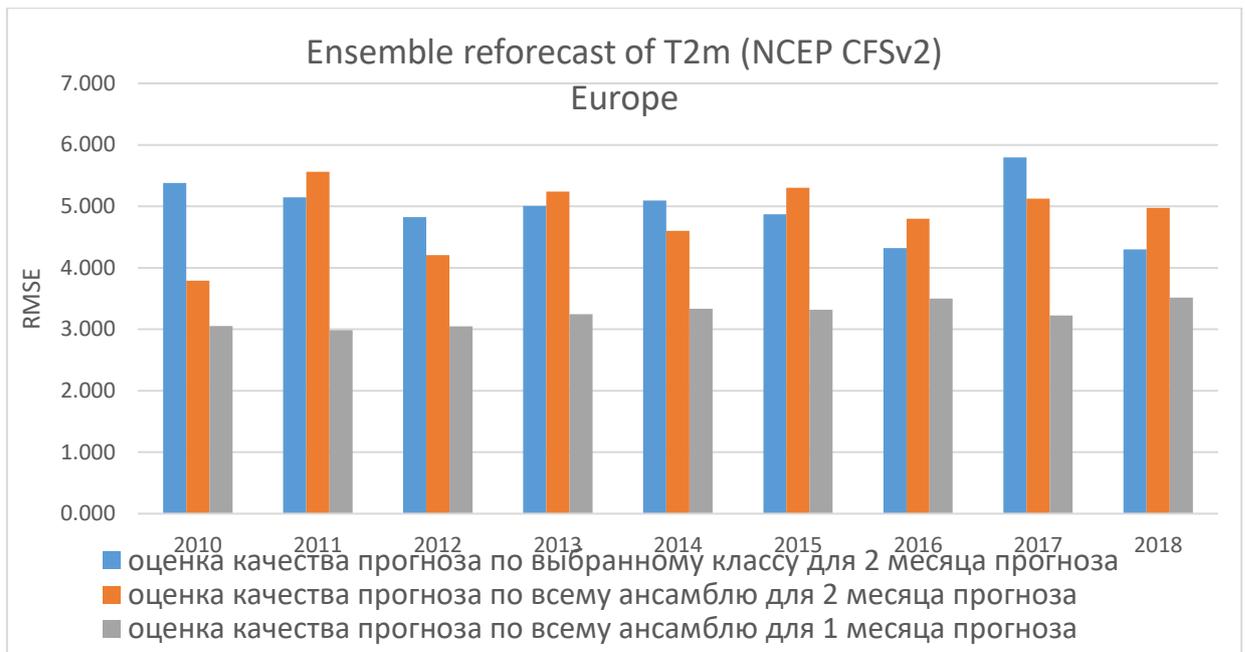


Рис. 3. Ансамблевый прогноз по температуре параметра RMSE по годам