



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Использование результатов гидродинамического прогноза в
метеорологическом обеспечении полётов»

Исполнитель Дубков Валерий Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 22 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. МЕТЕОРОЛОГИЯ: ЭВОЛЮЦИЯ ЗНАНИЙ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА РАЗЛИЧНЫЕ СФЕРЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	7
1.1. Эволюция знаний об атмосфере	7
1.2. Влияние воздушных потоков на авиацию	11
1.3. Прогноз скорости и направления ветра	19
1.3.1. Внедрение результатов численного прогнозирования в оперативную практику	20
1.3.2. Основные положения численного прогноза погоды	28
Глава 2. Оценка качества прогнозов	36
2.1. Оценка качества прогноза от 4 января на 72 часа	36
2.2. Анализ данных за 15 января на 72 часа	47
2.3. Анализ прогностических и фактических данных 26 января	52
2.4. Вспомогательные прогностические характеристики	57
Заключение	64
Список использованных источников и литературы	65
Приложение 1	67

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня большинство метеорологических бюро в мире прогнозируют погоду на основе численного моделирования глобальной циркуляции атмосферы, а также на основе регионального моделирование с лучшим разрешением. В середине XX века были разработаны первые модели атмосферы, которые позволяли предсказывать погоду на основе математических уравнений, описывающих физические процессы в атмосфере. На сегодняшний день численное моделирование атмосферных процессов является одним из основных инструментов прогнозирования погоды и климата, на который опираются все синоптики. Оно используется как в научных исследованиях, так и в практической деятельности метеорологических служб. Появление численных методов моделирования атмосферных процессов является закономерным этапом развития прогнозирования погодных условий, который дополняет зарекомендовавший себя синоптический метод.

Постоянно возрастающий объем данных требовал новых алгоритмов. Когда данных мало, с ними можно работать по-разному. Но когда их очень много, может потребоваться систематизация и даже автоматизация. Эффективное использование значительно возросших возможностей наблюдения за погодой, становление динамической метеорологии и значительное улучшение техники прогнозирования зависели от новой вычислительной техники, главным образом электронной вычислительной машины. Компьютер позволил установить многие новые связи между эмпирической, теоретической и практическими традициями разработки прогнозов, а также связи между метеорологией и другими дисциплинами, такими как океанология, гидрология и т.д. Огромное разнообразие расчетных приспособлений, использовавшихся метеорологами -

математические таблицы, номограммы, специальные логарифмические линейки, вычислительные формы и аналоговые компьютеры - было заменено одним устройством общего назначения. Физика становилась более актуальной для работы синоптиков. Велась работа над тем, чтобы объединить теорию и данные. Возросшая роль вычислений и использование вычислительных средств привели к тому, что синоптики постоянно производили расчеты. Это сделало разработку численных алгоритмов более значимой для исследователей. В середине XX века были разработаны первые модели атмосферы, которые позволяли предсказывать погоду на основе математических уравнений, описывающих физические процессы в атмосфере. Сегодня численное моделирование атмосферных процессов является одним из основных инструментов прогнозирования погоды и климата. Оно используется как в научных исследованиях, так и в практической деятельности метеорологических служб.

В данной работе излагаются принципы использования результатов прогностических гидродинамических моделей атмосферы для планирования, обеспечения экономической эффективности и безопасности полётов.

Целью исследования является оценка возможности использования результатов гидродинамического моделирования для метеорологического обеспечения полётов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Изучить модель гидродинамическая глобальная модель GFS (Global Forecast System).
2. Освоить работу с файлами, содержащими данные в формате GRIB, и создать архив прогностических и фактических данных за август 2023 года и январь 2024 год.
3. Изучить Java – приложение Panoply для визуализации результатов моделирования.

4. Провести оценку качества прогнозов применительно к району Балтийского моря и северной части Европейской территории России.
5. Разработать рекомендации по использованию результатов гидродинамического моделирования для планирования и обеспечения безопасности полётов.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 2 глав, заключения и списка использованных источников.

В первой части первой главы вкратце изложена история эволюции данных об атмосфере, во второй части влияние воздушных потоков на авиацию, как на одну из наиболее требовательных сфер к точности прогнозов. Достаточно подробно рассмотрены струйные течения, в контексте данной работы, в связи со значительным влиянием данного явления на эффективность и безопасность полетов.

Во второй главе проведена оценка качества прогноза метеорологических величин и произведена их визуализация с использованием функционала Java – приложения Raporly. Рассмотрены такие параметры как:

- Поля скорости ветра и на изобарических поверхностях;
- Максимальную скорость ветра в толще атмосферы от подстилающей поверхности до уровня 1 гПа;
- Геопотенциальные высоты уровня максимального ветра;
- Геопотенциальные высоты изобарических поверхностей;
- Фактическое и прогностическое поля температуры;
- Поля ошибок указанных параметров.

В последней части второй главы также рассмотрен такой параметр как индекс CAPE, высокие значения которого позволяют выявлять неустойчивость в атмосфере и он может быть полезен при прогнозировании конвективной

облачности. Также в качестве демонстрации функционала Java – приложения Raporty приведены такие параметры как:

- Покрытие земной поверхности льдом;
- Средний балл облачности.

Список использованных источников содержит труды отечественных и зарубежных ученых в области физики и метеорологии, учебные пособия по математическому моделированию атмосферных процессов. Также информационной базой для данной работы послужили электронные ресурсы по авиационной и метеорологической тематике.

1 МЕТЕОРОЛОГИЯ: ЭВОЛЮЦИЯ ЗНАНИЙ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА РАЗЛИЧНЫЕ СФЕРЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1.1 Эволюция знаний об атмосфере

Метеорология, какой мы знаем её в наши дни, является квинтэссенцией наблюдений, исследований и открытий, накопленных за столетия, учением, которое соединило в себе основные фундаментальные знания об окружающем мире. Она приоткрывает дверь в такие интересные науки как физика, математика, астрономия и т.д

В древности знания о погоде скорее сводились к мифологии, но людям было понятно что, наличие или отсутствие осадков определяет сколько урожая принесет земля. Проливные дожди приводят к наводнениям, а ураганы вызывают разрушения. Погодные приметы, такие как небольшое гало, окружающее солнце как предвестие дождя, были частью большинства культур с незапамятных времен. Древнегреческая мифология является примером того, как ранние цивилизации пытались объяснить необъяснимые в то время силы природы. Многие древнегреческие боги и богини были олицетворением элементов погоды и времен года.

Однако, благодаря постоянным наблюдениям за природой древние греки прекрасно разбирались в погоде и климате в целом. Возможно, она не была такой продвинутой, как современная наука, но их базовые знания помогли им лучше понимать изменения погоды и найти способы извлечь из них пользу.

В Древней Греции люди использовали свои знания в своих интересах, сосредотачиваясь на движении воздуха, широко известном как ветер, а также на значении положения Солнца и Луны на небе, чтобы прогнозировать такие

явления, как приливы и отливы, и улучшать повседневные задачи, связанные с сельским хозяйством.

Наступление эпохи Ренессанса вдохнуло в науку вторую жизнь, после нескольких веков застоя. Тогда на рубеже веков были сделаны значимые открытия: эксперименты Галилея со свободным падением тел, открытия Ньютона и Бернулли и многие другие. Разумеется, в дальнейшем все это повлияло на развитие метеорологии, которая еще не успела сформироваться как отдельная наука, но подготовило почву для её становления. Именно в эту эпоху и появились первые метеорологические приборы. В 1612 году все тот же Галилео Галилей изобрел термоскоп – простейший прибор с помощью которого можно было судить только о том, теплее ли стало или холоднее, насколько – измерить было нельзя, но он по сути послужил прообразом термометра. В 1643 году итальянским физиком и математиком Эванджелистой Торричелли был изобретен барометр. Торричелли проводил эксперименты с вакуумом и обнаружил, что столб жидкости в трубке имеет высоту, которая зависит от атмосферного давления. Со временем был изобретен термометр, вписав фамилии своих создателей в историю. Наиболее широкое распространение получили термометры Фаренгейта и Цельсия. Цельсий предложил свою шкалу для измерения температуры на основе двух фиксированных точек: точки замерзания воды (0°C) и точки кипения воды (100°C). Эта шкала стала очень популярной и используется во многих странах мира, включая Россию. Изобретение приборов способствовало накоплению данных метеорологических наблюдений и подготовило почву для выделения метеорологии в самостоятельную науку.

Данные метеорологических наблюдений, а также открытие основных законов физики позволили приступить к построению количественной теории распределения некоторых метеорологических величин, в первую очередь

давления. Еще в 1648 году Паскаль на основе данных измерений установил факт падения давления с высотой.

В середине XIX века начались систематические наблюдения за погодой с использованием современных приборов. В 19 веке были проведены первые аэрологические исследования с помощью воздушных шаров. В 1899 году американские ученые братья Уилсон запустили воздушный шар с приборами на высоту 9 километров. Они обнаружили, что на такой высоте температура воздуха составляет около -40 градусов Цельсия, а давление во много раз меньше чем на уровне моря.

К середине XIX века ученые поняли, что погоду следует изучать как целостную систему, а не в изолированных местах без привязки к тому, что происходит в других местах. Вторая половина XIX века ознаменовалась созданием карты погоды как основного инструмента метеорологического описания, анализа и прогноза. Электрический телеграф позволил собирать данные на больших территориях в режиме реального времени и сделал возможным составление карт погоды в течение одного дня. Развитие промышленности, транспорта и значительный рост торговли повысил ценность информации о погоде и климате. Все эти преобразования привели к созданию национальных метеорологических служб, сетей наблюдателей и международного сотрудничества между метеорологами. А это в свою очередь позволило систематизировать наблюдения и привело к формированию синоптического метода, сущность которого состоит в одновременном обзоре состояния атмосферы на обширной территории, позволяющем определить характер развития атмосферных процессов и дальнейшее наиболее вероятное изменение погодных условий в интересующем районе. Официальной датой начала службы погоды в России считается 1 января 1872 года, когда в Главной физической обсерватории, основанной 1 апреля 1849 года в Санкт-Петербурге

(ныне «Главная геофизическая обсерватория» им. А. И. Воейкова), начался регулярный выпуск ежедневного бюллетеня погоды.

В годы Первой мировой войны в воздухе уже во всю господствовала авиация. Авиаторы столкнулись с необходимостью предсказывать погоду и выбирать наиболее благоприятные условия для полетов. Метеорологи проводили наблюдения за погодой и передавали информацию пилотам. Они также совершенствовали методы прогнозирования погоды и составляли метеорологические карты, которые помогали авиаторам выбирать маршрут и время для полетов.

Вскоре после Первой мировой войны группа норвежских метеорологов под руководством Бьеркнеса в Бергене ввела понятия холодного и теплого фронтов, полярного фронта и воздушных масс, которые оказались полезными в прогнозировании. Хотя данные методы значительной степени не зависели от динамической метеорологии, последняя все же начала быть весьма полезной для синоптиков незадолго до Второй мировой войны, особенно благодаря работам Карла Густава Россби. Россби вывел уравнение, которое используется для изучения динамики крупномасштабных атмосферных процессов, таких как циклоны и антициклоны, а также для прогнозирования их движения.

Радио привело к значительному расширению сетей наблюдений: связь между кораблями и буями, передача метеорологических данных с приборов, поднятых в воздух на воздушных шарах. Постоянно возрастающий объем данных требовал новых алгоритмов. Когда данных мало, с ними можно работать по-разному. Но когда их очень много, может потребоваться систематизация и даже автоматизация. Эффективное использование значительно возросших возможностей наблюдения за погодой, становление динамической метеорологии и значительное улучшение техники прогнозирования зависели от новой вычислительной техники, главным образом электронной вычислительной

машины. Компьютер позволил установить многие новые связи между эмпирической, теоретической и практическими традициями, а также связи между метеорологией и другими дисциплинами, такими как океанология, гидрология и т.д. Огромное разнообразие расчетных приспособлений, использовавшихся метеорологами - математические таблицы, номограммы, специальные логарифмические линейки, вычислительные формы и аналоговые компьютеры - было заменено одним устройством общего назначения. Физика становилась более актуальной для работы синоптиков. Велась работа над тем, чтобы объединить теорию и данные. Возросшая роль вычислений и использование вычислительных средств привели к тому, что синоптики постоянно производили расчеты. Это сделало разработку численных алгоритмов более значимой для исследователей. В середине XX века были разработаны первые модели атмосферы, которые позволяли предсказывать погоду на основе математических уравнений, описывающих физические процессы в атмосфере. Сегодня численное моделирование атмосферных процессов является одним из основных инструментов прогнозирования погоды и климата. Оно используется как в научных исследованиях, так и в практической деятельности метеорологических служб.

1.2 Влияние воздушных потоков на авиацию

В зависимости от распределения атмосферного давления воздух постоянно перемещается в горизонтальном направлении. Это горизонтальное перемещение называется ветром.

Погодные условия оказывают серьезное влияние на работу авиации. Наиболее сильное влияние на полеты оказывает ветер. Основные причины отмены рейсов, задержек и даже авиакатастрофы со смертельным

исходом могут быть связаны с этим явлением. Сдвиг ветра означает резкое изменение скорости или направления ветра в атмосфере. Особенно актуальной является информация о наличии сдвига ветра во время посадки или при взлете (рисунок 1.1). Сдвиг ветра может повлиять на подъемную силу самолета, что в результате может привести к отклонению воздушного судна (ВС) от курса или к потере высоты. Все это вызывает повышение нагрузки на экипаж, приводит к ухудшению ситуационной осведомленности экипажем и может поставить под угрозу взлет или посадку самолетов. Сдвиг ветра может быть вертикальным или горизонтальным, или смесью обоих типов. ИКАО (ICAO – International Civil Aviation Organization) определяет вертикальную и горизонтальную составляющие сдвига ветра следующим образом:

- вертикальный сдвиг ветра определяется как изменение горизонтального направления и/или скорости ветра с высотой, которое определяется с помощью двух или более анемометров, установленных на разной высоте на одной мачте.
- горизонтальный сдвиг ветра определяется как изменение горизонтального направления и/или скорости ветра в зависимости от горизонтального расстояния, которое определяется двумя или более анемометрами, установленными на одинаковой высоте вдоль взлетно-посадочной полосы.

Нисходящий порыв создается областью значительно охлажденного дождем нисходящего воздуха, который после достижения уровня земли распространяется во всех направлениях, вызывая сильные ветры. Нисходящий порыв, затрагивающий территорию диаметром до 4 км или менее, это явление обычно называют микропорывом.

Скорость и направление ветра всё время меняются. Средние скорости ветра у земной поверхности близки к 5-10 м/с. Но иногда, в сильных атмосферных вихрях, скорости ветра у земной поверхности могут достигать и

превышать 50 м/с. В высоких слоях атмосферы, в так называемых струйных течениях, регулярно наблюдаются скорости ветра до 100 м/с и более.

К горизонтальному переносу воздуха присоединяются и вертикальные составляющие. Они обычно малы по сравнению с горизонтальным переносом, порядка сантиметров или десятых долей сантиметра в секунду. Только в особых условиях при конвекции, на небольших участках атмосферы вертикальные составляющие скорости движения воздуха могут достигать нескольких метров в секунду.

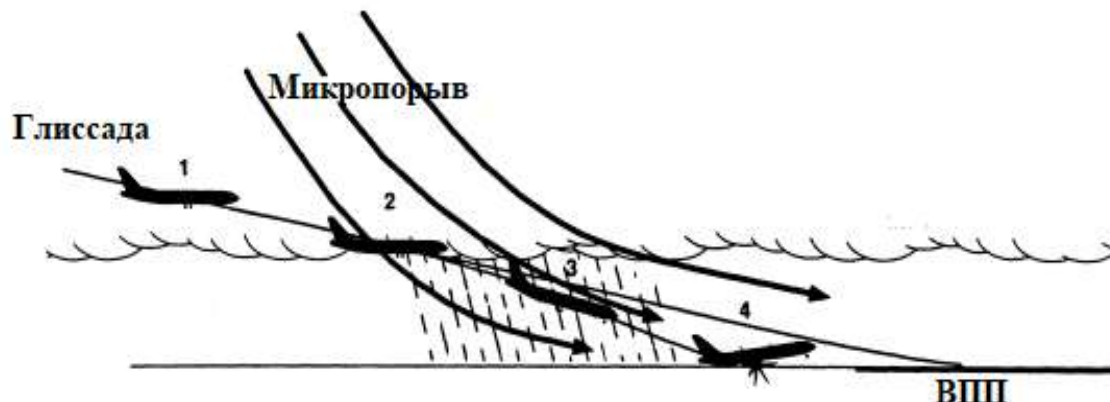


Рисунок 1.1 – Сдвиг ветра при заходе на посадку. (1) Заход в нормальном режиме (2) Возникновение сильного нисходящего потока воздуха (3) Увеличение вертикальной скорости выше расчетной (4) Возникает опасность невыдерживания высотного профиля [5]

Ветер всегда обладает турбулентностью. Это значит, что отдельные массы воздуха в потоке ветра перемещаются не по параллельным траекториям. В воздухе возникают многочисленные беспорядочно движущиеся вихри и струи разных размеров. Отдельные количества воздуха, увлекаемые этими вихрями и струями, так называемые элементы турбулентности, движутся по всем

направлениям, в том числе и перпендикулярно к общему или среднему направлению ветра и даже против него. Эти элементы турбулентности – не молекулы, а крупные объемы воздуха, линейные размеры которых измеряются сантиметрами, метрами, десятками метров. Таким образом, на общий перенос воздуха в определенном направлении и с определенной скоростью налагается система хаотических, беспорядочных движений отдельных элементов турбулентности по сложным переплетающимся траекториям.

Турбулентность часто возникает вследствие различия скоростей ветра в смежных слоях воздуха. Особенно велика она в нижних слоях атмосферы, где скорость ветра быстро растет с высотой. Но в развитии турбулентности принимает участие и так называемая архимедова, или гидростатическая, сила. Отдельные объёмы воздуха поднимаются вверх, если их температура выше, а стало быть, плотность меньше, чем температура и плотность окружающего воздуха. Напротив, объёмы воздуха более холодные и плотные, чем окружающий воздух, опускаются вниз. Такое перемешивание воздуха за счет различий плотности происходит тем интенсивнее, чем быстрее падает температура с высотой, то есть чем больше вертикальный градиент температуры. Поэтому можно условно говорить о динамической турбулентности, возникающей независимо от температурных условий, и о термической турбулентности (или конвекции), определяемой температурными условиями.

Турбулентность с преобладанием термических причин при определенных условиях более или менее резко меняет свой масштаб: превращается в упорядоченную конвекцию. Вместо мелких хаотически движущихся турбулентных вихрей в ней начинают преобладать мощные восходящие движения воздуха типа струй или токов, со скоростями порядка нескольких метров в секунду, иногда свыше 20 м/с. Такие мощные восходящие потоки называются термиками. Турбулентность ясного неба (ТЯН) определяется как

внезапная сильная турбулентность, возникающая в безоблачных регионах, которая вызывает сильную тряску воздушного судна. Этот термин обычно применяется к турбулентности на больших высотах, связанной со сдвигом ветра. Наиболее полное определение - высотная турбулентность, возникающая за пределами конвективных облаков. Это включает турбулентность в перистых облаках, внутри и вблизи стоячих линзовидных облаков и, в некоторых случаях, в чистом воздухе вблизи гроз. Однако, как правило, определения ТЯН исключают турбулентность, вызванную грозами, низковисотными температурными инверсиями, термическими потоками, сильными приземными ветрами или местными особенностями рельефа.

Распространенными причинами и источниками ТЯН являются струйные течение. Струйное течение – это узкое, быстро движущееся воздушное течение, обычно близкое к тропопause и возникающее в результате температурного градиента между воздушными массами (рисунок 1.2).

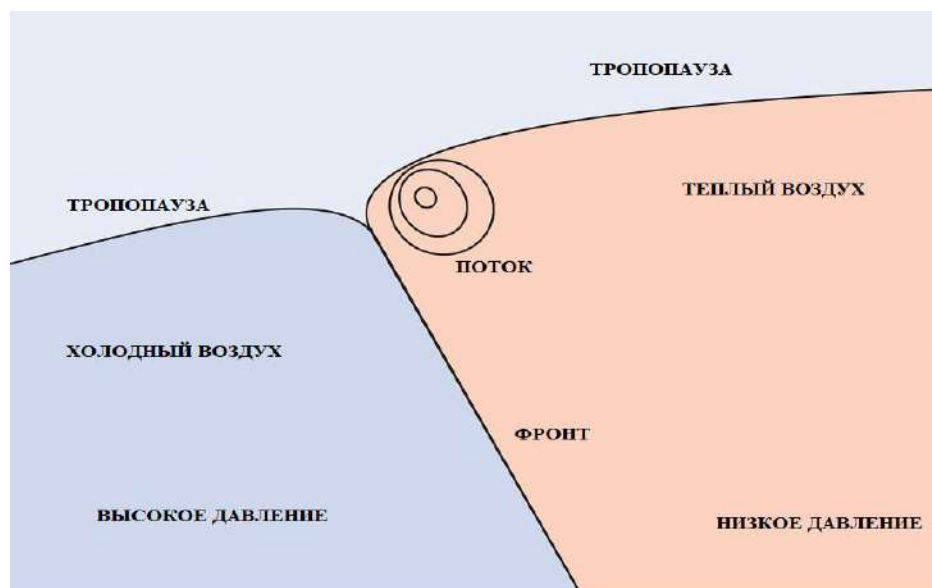
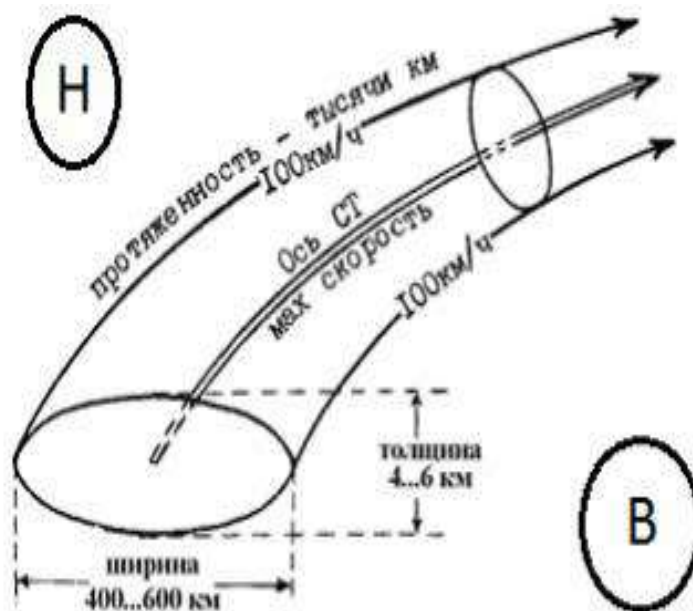


Рисунок 1.2 – Поперечное сечение струйного течения [3]

Хотя не все струйные течения связаны с ТЯН, они могут быть значительными по вертикали и горизонтали. Небольшой сдвиг ветра по краям струйного потока, иногда приводящий к сильной турбулентности ясного неба. Любая ТЯН сильнее всего ощущается на холодной стороне струйного потока, где сдвиг ветра наибольший. В непосредственной близости от струйного течения ТЯН можно встретить на высоте от 2500 метров ниже тропопаузы до примерно 1000 метров над ней. Поскольку сильный вертикальный и горизонтальный сдвиг ветра возникает на коротких расстояниях, этот связанный с реактивным потоком поток, как правило, неглубокий и неоднородный, поэтому для выхода из зоны турбулентности часто бывает достаточно снижения или подъема всего на 2000 футов.

Струйное течение напоминает сильно сплюснутую трубу гигантских размеров, высота которой 1-5 км, ширина 500-1000 км и длина несколько тысяч км. Иногда струйные течения огибают весь земной шар. Границей струйного течения считается скорость ветра 150 км/ч. Наибольшие скорости наблюдаются в центральной части струйного течения – сердцевине. Линия максимального ветра внутри сердцевины – ось струйного течения. Схема струйного течения представлено на рисунке 1.3.



Н – высокая циклоническая область,
В – высокая антициклоническая область.

Рисунок. 1.3 – Схематическое изображение струйного течения [1]

Двумя основными областями активности струйных течений в верхней тропосфере являются субтропические струйные течения вблизи 30 градусов широты и полярные струйные течения в средних широтах. Оба преимущественно ориентированы с запада на восток (рисунки 1.4, 1.5). Существует также струйное течение направленное преимущественно с востока на запад над экваториальными массивами суши и пояс сильных ветров в стратосфере над зимним полюсом, «полярная ночная струя», на высоких широтах и выше FL600 или уровня 50 гПа.

Полярное струйное течение образуется в результате температурного градиента между холодной полярной воздушной массой и более теплой субтропической воздушной массой. Поскольку разница температур наибольшая зимой, скорость полярного струйного течения также максимальна зимой. Высота его обычно находится на уровне 250-300 гПа.

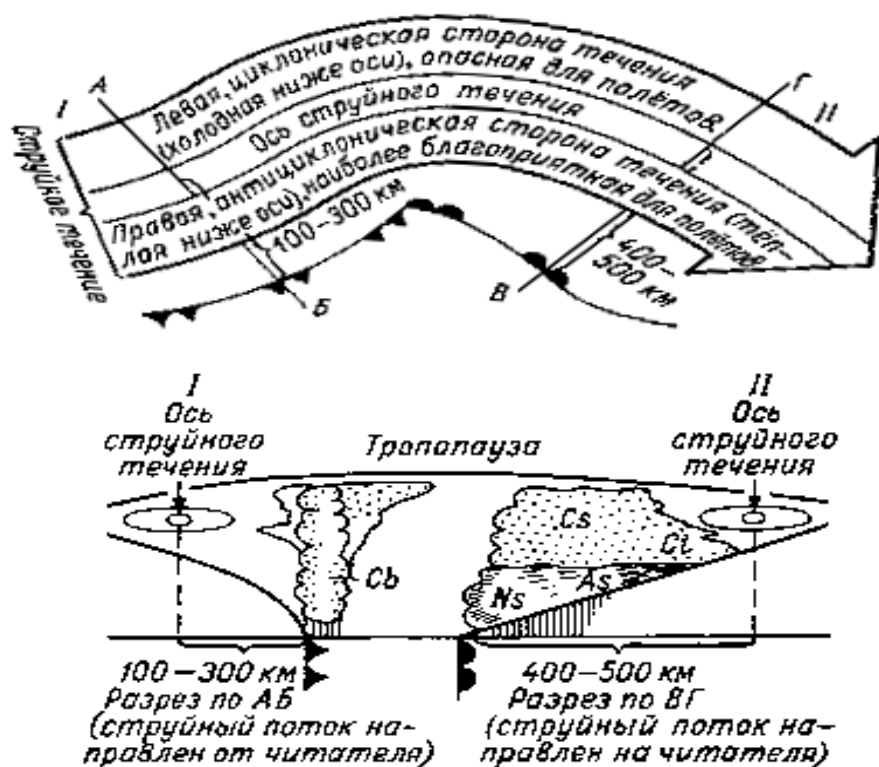


Рисунок 1.4 – Положение струйного течения относительно атмосферных фронтов [1]

С практической авиационной точки зрения информация о наличии струйного течения важна для определения маршрута самолетов на дальнемагистральных рейсах. Попутный ветер со скоростью 100 узлов и более может оказаться большим благом с точки зрения расхода топлива, тогда как встречный ветер может стать фактором, увеличивающим расход топлива, что приводит к удорожанию полета. В более общих метеорологических терминах реактивное течение является очевидным проявлением работы атмосферы в целом. Во время и после Второй мировой войны синоптики изучали характер ветров на высотах, чтобы определить, как атмосфера может развиваться в

течение следующих 2 или 3 дней. Эти идеи были использованы как возможная помощь морякам в понимании погоды.

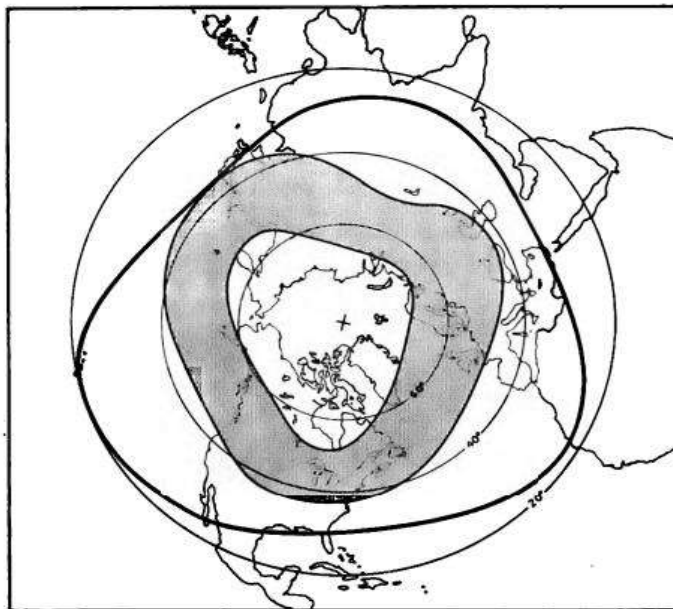


Рисунок 1.5 – Средняя ось субтропического струйного течения зимой (сплошная линия) и область основной активности струйного течения полярного фронта (заштриховано) [2]

1.3 Прогноз скорости и направления ветра

Высокоточный прогноз скорости ветра представляет собой сложную задачу, поскольку ветер представляет собой трёхмерную, сложную переменную, носящую весьма локальный характер. На приземный ветер влияют три категории характеристик топографии:

- неровность,
- препятствия,
- орография.

Прогноз направления ветра делается специалистами синоптическим методом. В интересах авиации направление ветра указывается в десятках градусов. Это нужно чтобы экипажи ВС смогли оценить встречную, попутную и боковую составляющую скорости ветра. Для обеспечения безопасности при взлете и посадке самолетов существуют ограничения по боковому, встречному и попутному ветру. Также авиакомпания и службы управления воздушным движением (УВД) нуждаются в информации о направлении и скорости ветра на высотах. Крупные прогностические центры разрабатывают прогноз ветра на различных уровнях численными методами. Результаты этих расчетов оформляются в виде карт температуры и ветра и передаются всем потребителям, нуждающимся в этой информации.

1.3.1 Внедрение результатов численного прогнозирования в оперативную практику

Успех численного прогнозирования состоял из двух составляющих: точности, превышающей точность субъективного прогнозирования, и возможности составлять прогнозы достаточно быстро, чтобы они были полезными. Точность численного прогнозирования была продемонстрирована во многих испытаниях. Первые успехи были достигнуты в начале и середине 1950-х годов: большинство метеорологов были удивлены тем, насколько хорошими оказались самые первые модельные прогнозы – баротропные прогнозы, сделанные на компьютере ENIAC в 1950 году, и уже в 1952 году - бароклинные прогнозы, сделанные на компьютере Института перспективных исследований, можно было сказать, что численные прогнозы иногда оказывались лучше субъективных. Потребовалось совсем немного времени, чтобы показать, что численное прогнозирование осуществимо в оперативном плане.

По масштабу модели прогноза погоды можно разделить на три основных типа (рисунок 1.6)



Рисунок 1.6 – Глобальные модели, мезомасштабные модели и микромасштабные модели [7]

Глобальные модели. Модели глобального прогноза погоды охватывают весь земной шар и предоставляют прогнозы в крупном масштабе. Эти модели используют сетку для разделения поверхности Земли на множество точек для анализа и прогнозирования. Двумя хорошо известными глобальными погодными моделями являются Глобальная система прогнозов (GFS) и модель Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).

Мезомасштабные модели численного прогнозирования погоды ориентированы на конкретные регионы, такие как целые страны, и предоставляют прогнозы с более высоким разрешением по сравнению с глобальными моделями. Эти модели особенно полезны для прогнозирования локальных погодных явлений и суровых погодных явлений.

Микромасштабные модели. В отличие от более крупномасштабных моделей прогноза погоды, которые охватывают более крупные регионы, такие как страны или континенты, микромасштабные модели масштабируются на небольших территориях, таких как города или районы. Микромасштабные

модели учитывают уникальные характеристики местного рельефа, землепользования и городских особенностей, которые могут существенно влиять на погодные условия на небольшой территории. Эти модели используют данные высокого разрешения и сложные алгоритмы для моделирования атмосферных процессов в мелком масштабе, фиксируя такие детали, как характер местного ветра, колебания температуры и эффекты городских островов тепла.

Некоторые из наиболее известных глобальных численных моделей:

Глобальная система прогнозов GFS (ранее AVN) – разработана National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Модель совместная и включает в себя модели четырёх систем – атмосфера, океан, суша/почва, морской лёд –и это обеспечивает корректное описание атмосферных процессов. Основные метеорологические величины, прогнозируемые моделью – температура, ветер, осадки, влажность, концентрация озона. Кроме основных прогностических переменных выдаются результаты расчёта большого количества характеристик атмосферы, океана, вод суши и морского льда. Этой моделью разрабатывается прогноз с заблаговременностью 16 суток. Шаг по горизонтали около 13 км, вертикальная протяжённость до мезопаузы (примерно до 80 км) с использованием 127 уровней по вертикали. Доступ к результатам прогноза свободный.

Модель NOGAPS (Navy Operational Global Atmospheric Prediction System)-разработана ВМС США и с её помощью разрабатываются оперативные прогнозы, учитывающие и взаимодействие атмосферы и океана. Прогностические поля представлены на 18 (или 28) уровнях в атмосфере и 34 уровнях в океане. Прогнозы разрабатываются каждые 6 часов на глобальной сетке с шагом или 0,5 или 1,0 градуса широты и долготы.

Глобальная многомасштабная модель окружающей среды GEM (Global Environmental Multiscale Model) – разработана и используется

Метеорологической службой Канады (MSC). Заблаговременность прогнозов 10 дней. Шаг по горизонтали 25 км. Модель закрытая и даже описание модели найти трудно.

Модель IFS (Integrated Forecasting System) разработана Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды. Это спектральная модель атмосферы с использованием ассимиляции 4D-VAR. По вертикали гибридная система координат с 137 уровнями. Шаг по горизонтали 9 км. Прогноз выдаётся каждые 6 часов с заблаговременностью 90 часов. Есть ансамблевая версия модели и более грубая версия (шаг 18 км по горизонтали), которая разрабатывает прогноз на 45 суток и даже на 1 год. Это совместная модель – используется модель океана NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean).

Модель ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) разработана Немецкой метеорологической службой DWD совместно с Институтом метеорологии Макса Планка (MPI), Гамбург. Модель негидростатическая. Шаг по горизонтали около 13 км на икосаэдральной сетке. По вертикали модель описывает атмосферу приблизительно до 75 км (90 уровней в повторяющей рельеф системе координат).

Модель ARPEGE разработан Французской метеорологической службой Météo-France. Это спектральная модель по горизонтали. По вертикали используется метод конечных элементов в гибридной (давление-сигма) системе координат (105 уровней). Шаг по горизонтали около 24 км. Прогноз выдаётся каждые 6 часов с максимальной заблаговременностью 114 часов. Основные прогностические переменные – температура, влажность, горизонтальный ветер, гидрометеоры (облачные капли, кристаллы льда, осадки (дождь/снег)).

Модель IGCM (Intermediate General Circulation Model) разработана университетом Рединга. Прилагательное «промежуточная» означает, что это упрощённая модель, которая предполагает расчёты на рабочих станциях. Для этого упрощено описание некоторых физических процессов. Модель

спектральная с использованием сигма-системы координат по вертикали. Адиабатическая версия модели находится в свободном доступе.

Глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ (от ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности, в английском варианте – SL-AV) разработана в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН и Гидрометцентре России. Внедрение модели ПЛАВ в качестве основного численного метода глобального среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России в начале 2010 года позволило примерно в два раза сократить отставание России, по сравнению с лидирующей группой мировых прогностических центров, в ошибках прогноза давления на уровне моря, температуры на уровне 850 гПа, высоты поверхности 500 гПа и других параметров. Оригинальными особенностями блока решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ являются применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений и использование вертикальной компоненты абсолютного вихря и дивергенции в качестве прогностических переменных. Существенным элементом для модели атмосферы, основанной на переменных «вертикальный компонент абсолютной завихренности – горизонтальная дивергенция», является быстрый и точный алгоритм восстановления компонент горизонтальной скорости ветра. Ближайшие планы развития модели ПЛАВ связаны с настройкой новой версии модели с разрешением 6–12 км, наладкой и внедрением блока усвоения влагосодержания почвы на основе SEKF [3], совместном с многослойной моделью почвы [2], представленного в разделе 3. Также предполагается внедрить в модель усовершенствованное описание процессов глубокой конвекции и стохастическое описание облачности для расчета радиационных потоков. Горизонтальное разрешение систем глобального среднесрочного прогноза погоды ведущих мировых центров в настоящее время

составляет 7–9 км. Рост доступных вычислительных ресурсов в скором времени даст возможность использовать и более подробные сетки. Таким образом, дальнейшие планы связаны с разработкой нового динамического блока с разрешением 3–5 км. Однако построение глобальных моделей с шагом сетки менее 10 км путем простого масштабирования существующих моделей невозможно, так как возникает ряд проблем.

Результаты прогноза модели ПЛАВ представлены на сайте Гидрометцентра РФ [15]. Пример прогностической карты представлен на рисунке 1.7.

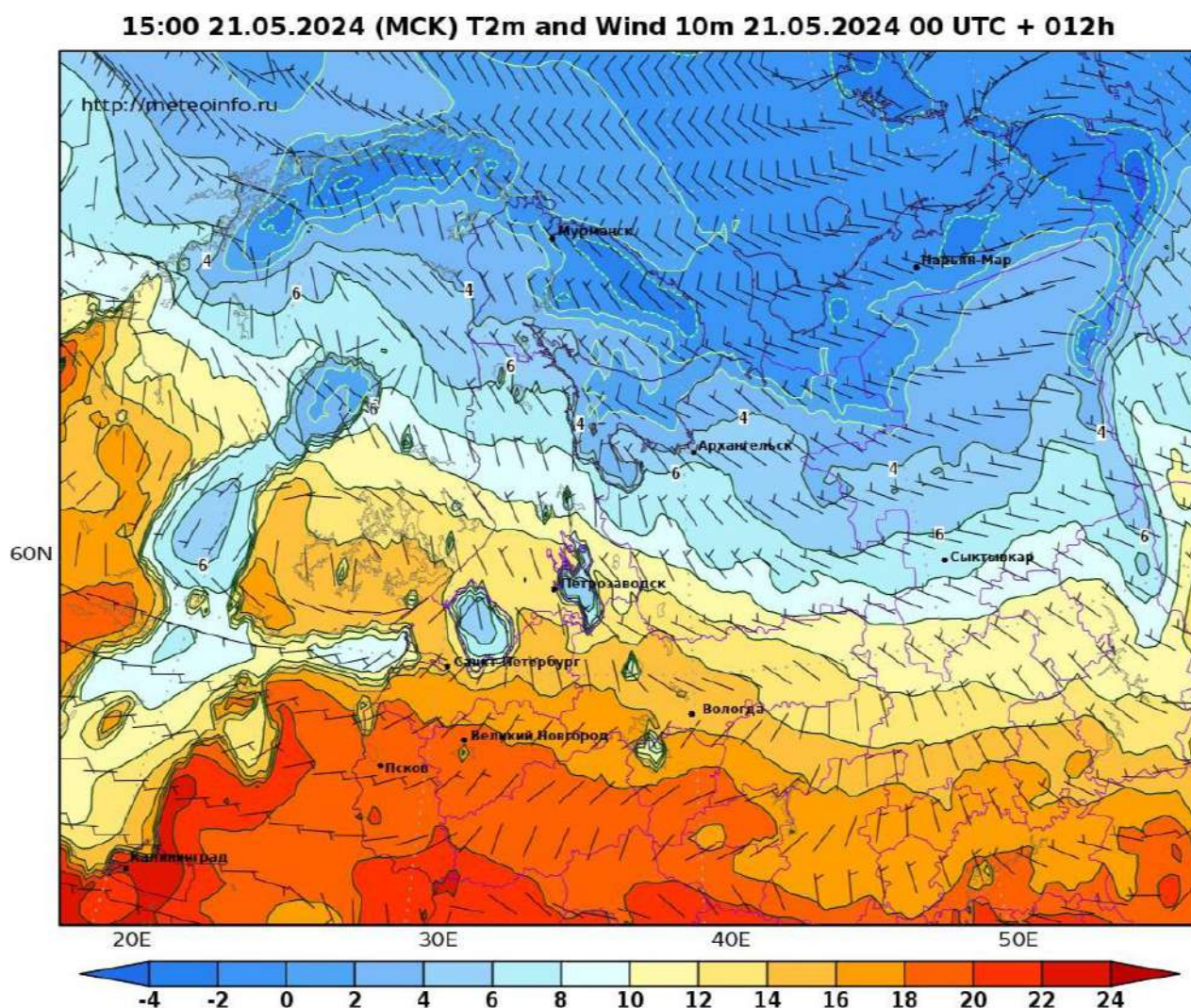


Рисунок 1.7 – Прогноз температуры на высоте 2 метра и ветра на высоте 10 метров (модель ПЛАВ) [4]

Некоторые из наиболее известных региональных численных моделей: Модель WRF (Weather Research and Forecasting) была разработана совместно NCEP, NCAR и метеорологическим исследовательским сообществом. WRF имеет несколько конфигураций, в том числе: WRF-NMM – егидростатическая мезомасштабная модель WRF является основной моделью краткосрочного прогноза погоды в США. Версия модели WRF-ARW используется в оперативной практике большого количества мировых метеорологических центров и для научных исследованиях в большинстве стран, в том числе и в Российской Федерации и в РГГМУ.

HARMONIE-Climate (HCLIM) — это климатическая модель для ограниченной территории, основанная на модели HARMONIE, разработанной крупным консорциумом европейских институтов прогнозирования погоды и исследовательских институтов. Это модельная система, которую, как и WRF, можно запускать во многих конфигурациях, в том числе с высоким разрешением с негидростатической физикой – AROME или с более низким разрешением с гидростатической физикой, основанной на физических схемах – ALADIN. В основном он использовался в Европе и Арктике для изучения климата, включая улучшение разрешения для интересующих регионов и для исследования экстремальных погодных явлений. Это негидростатическая модель с шагом около 2,5 км и явно описывающая конвекцию.

Модель RASMO была разработана в Нидерландском метеорологическом институте KNMI и основана на динамике модели HIRLAM с физическими схемами из глобальной модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды IFS. RASMO2.3p2 — это полярная версия модели, используемая во

многих исследованиях для обеспечения корректного описания баланса поверхностной массы полярных ледниковых щитов, разработанной в Утрехтском университете.

Модель MAR (Modele Atmospherique Regionale) — региональная климатическая модель, разработанная в Университете Гренобля во Франции и Университете Льежа в Бельгии.

Модель HIRHAM5 — это региональная климатическая модель, разработанная Датским метеорологическим институтом и Институтом Альфреда Вегенера в Потсдаме (Германия). Она также основана на динамике модели HIRLAM с физическими схемами, основанными на моделях ECHAM. Как и модель RASMO, модель HIRHAM широко использовалась во многих частях мира в рамках схемы CORDEX для предоставления региональных прогнозов климата. Она также имеет полярный вариант, который использовался для изучения полярных ледниковых покровов Гренландии и Антарктиды.

Термин NAM (Североамериканская мезомасштабная модель) относится к любой региональной модели, которую NCEP использует в регионе Северной Америки. NCEP начала использовать эту систему обозначений в январе 2005 года. С января 2005 года по май 2006 года это обозначение использовалось в модели Eta. Начиная с мая 2006 года NCEP начала использовать WRF-NMM в качестве оперативного NAM.

Модель RAMS — система регионального моделирования атмосферы, разработанная в Университете штата Колорадо для численного моделирования атмосферной метеорологии и других явлений окружающей среды в масштабах от метров до сотен километров - теперь поддерживается в открытом доступе.

Модель ARPS, расширенная региональная система прогнозирования, разработанная в Университете Оклахомы, представляет собой комплексную многомасштабную систему негидростатического моделирования и

прогнозирования, которую можно использовать для прогнозирования погоды в региональном масштабе, вплоть до моделирования и прогнозирования масштаба торнадо. Усовершенствованная ассимиляция радиолокационных данных для прогнозирования гроз является ключевой частью системы.

Модель для ограниченной территории высокого разрешения HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) разработана европейским исследовательским консорциумом по численным прогнозам погоды при совместном финансировании 10 европейских метеорологических служб. Мезомасштабная модель HIRLAM, известная как HARMONIE, разработана в сотрудничестве с консорциумами Meteo France и ALADIN.

Модель GEM-LAM Глобальная экологическая многомасштабная модель для ограниченной территории, GEM с высоким разрешением 2,5 км, разработанная Метеорологической службой Канады (MSC).

Модель ALADIN – гидростатическая (есть и негидростатическая версия модели) для ограниченного региона с высоким разрешением, разработанная и эксплуатируемая несколькими странами Европы и Северной Африки под руководством Meteo France.

Модель COSMO, ранее известная как LM, aLMo или LAMi, представляет собой негидростатическую модель для ограниченной площади, разработанную в рамках Консорциума по маломасштабному моделированию (Германия, Швейцария, Италия, Греция, Польша, Румыния и Россия).

Meso-NH Модель Meso-NH представляет собой негидростатическую модель для ограниченной территории, разработанную совместно Национальным центром метеорологических исследований и Аэрологической лабораторией (Франция, Тулуза) с 1998 года.

Информация о сравнении точности описанных выше моделей приведена в таблице 1.1, в которой представлена оценка точности прогноза давления на уровне моря при заблаговременности прогноза 120 часов.

Таблица 1.1 – Рейтинг глобальных прогностических моделей в 2023 году [8]

Место	Модель	Страна	Точность, %	Разница с 2022 г. %	Отставание от ECMWF, лет
1	ECMWF	Европа	89.27	-1.26	0
2	UKMO	UK	87.79	-1.23	7
3	ICON	Германия	86.76	-1.31	8
4	BOM	Австралия	86.68	-0.77	10
5	CMC	Канада	86.54	-0.76	8
6	JMA	Япония	86.18	-1.01	11
7	GFS	США	85.46	-1.59	11
8	KMA	Корея	85.12	-1.37	14
9	CMA	Китай	81.68	0.25	15
10	ПЛАВ	Россия	78.42	-0.75	18
Источник: wmo/cdriv.ecmwf.int				-0.98	

1.3.2 Основные положения численного прогноза погоды

Основу всех прогностических моделей атмосферы составляют уравнения движения, притока тепла, неразрывности, переноса влаги и атмосферных примесей, являющиеся математическим выражением законов физики (законы сохранения импульса, энергии и массы), а также уравнение состояния. Эти уравнения для идеальной атмосферы (без учета турбулентной вязкости), записанные в относительной системе координат, связанной с вращающейся Землей и с абсолютной системой координат, ось которой совпадает с осью вращения Земли (рисунок 1.6), имеют следующий вид:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} + \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

- Закон сохранения импульса

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho \mathbf{V}$$

- Закон сохранения массы

$$Q = C_v \frac{dT}{dt} - \frac{RT}{P} \frac{dP}{dt}$$

- Закон сохранения энергии

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{\rho} \varepsilon_q + F_q$$

- Закон сохранения вещества

$$P = \rho R T$$

- Уравнение состояния

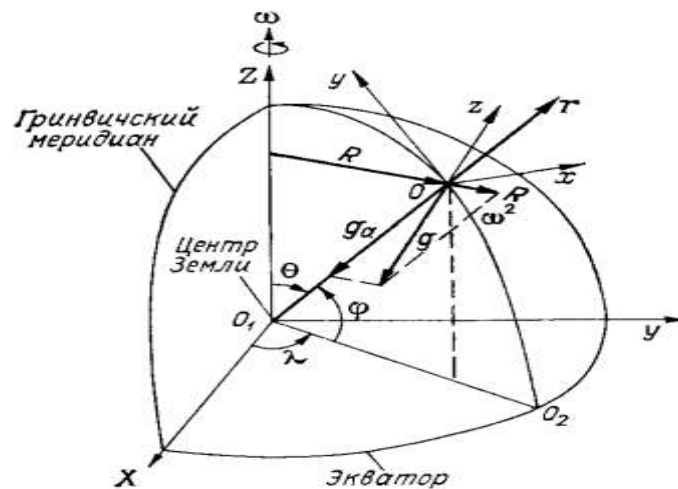


Рисунок 1.8 – Абсолютная (инерционная) система координат с началом в центре Земли Ox и одной из осей (z) прямоугольной системы координат, совпадающей с осью Земли и направленной с юга на север, а также

относительные системы координат, связанные с Землей, вращающейся с угловой скоростью ω [16]

Для построения атмосферных моделей в качестве горизонтальных координат используют либо декартовы либо сферические координаты. При использовании декартовой системы координат земную поверхность проецируют на плоскость, выбирают центр координат и проводят ортогональные оси x и y ; ось x , как правило, направлена на восток, а ось y на север. Независимыми переменными по горизонтали являются координаты x и y . В метеорологии чаще всего используются три типа картографической проекции – способа отображения земной поверхности на плоскость:

- стереографическая полярная проекция – для прогнозов в средних широтах,
- коническая прямоугольная проекция (Ламбертова) – для прогнозов в полярных областях,
- цилиндрическая прямая проекция (Меркатора) – для прогнозов в экваториальной зоне.

При использовании сферической системы координат земную поверхность аппроксимируют сферой, начало координат помещают в центр сферы и в качестве независимых переменных по горизонтали используют долготу (λ) и широту (φ). Положительными являются составляющие вектора скорости, направленные на восток (зональная составляющая) и север (меридиональная составляющая). При формулировке уравнений в сферических координатах применяется так называемая «традиционная аппроксимация». Её суть состоит в том, что вся масса атмосферы считается сосредоточенной в нескольких десятках километров у поверхности Земли, и можно пренебречь некоторыми метрическими слагаемыми уравнений движения.

Атмосферные модели должны рассчитываться на трехмерной сетке точек. Чем ближе точки расположены друг к другу, тем лучше модель передает атмосферу и топографию. Практическая проблема заключается в том, что для небольших горизонтальных сеток требуется больше уровней по вертикали и более короткие временные шаги. Это требует большей вычислительной мощности. Глобальная модель необходима для составления ежедневных прогнозов на ближайшие несколько дней. Доступная вычислительная мощность в 2018 году ограничивает длину сетки примерно до 9 км для ECMWF, 10 км для Великобритании и 13 км для моделей GFS (США) и ICON (Германия). На короткий период местное прогнозирование. Короткая длина сетки используется на небольших площадях. Эти сетки варьируются от 1 км до примерно 7 км.

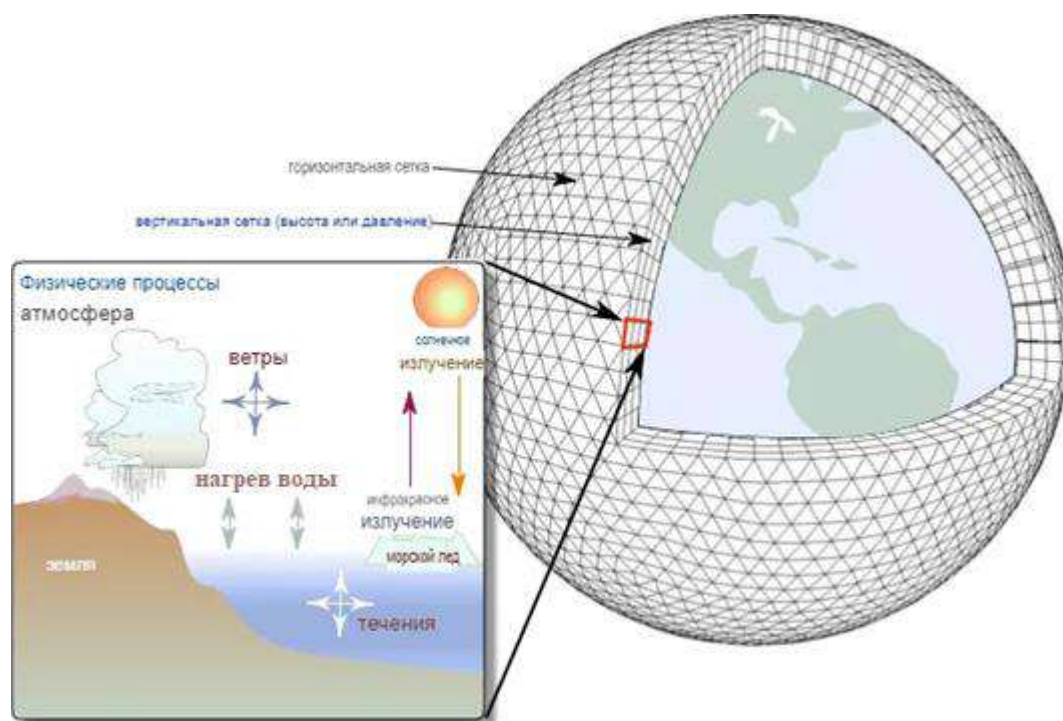


Рисунок 1.9 – Принципиальная схема численной модели атмосферы [2]

На рисунке 1.9 показано, как в климатической модели мир разбит на множество областей. Модели с высоким разрешением содержат миллионы областей! Области называются ячейками сетки. Каждая ячейка сетки имеет местоположение, основанное на ее положении на земле и на том, в каком вертикальном слое она находится.

Вертикальные слои - это слои воздуха над землей, похожие на кучу одеял, покрывающих землю одно на другом. Каждое "одеяло" будет представлять собой вертикальный слой. В модели толщина каждого слоя может составлять несколько десятков метров в нижней тропосфере и десятки километров в верхней атмосфере или определяться различными уровнями давления по мере увеличения удаления от поверхности Земли. В современных моделях используют уровни по вертикали, повторяющие рельеф, которые «выпрямляются» при удалении от поверхности, уменьшая влияние рельефа на атмосферные процессы на больших высотах.

Для составления прогноза нам необходимо знать современное состояние атмосферы и поверхности Земли (суши и океанов). Прогнозируя погоду, модели используют ассимиляцию данных для оценки начальных условий для модели прогноза на основе метеорологических наблюдений. Целью ассимиляции данных является определение наилучшего возможного состояния атмосферы и его неопределенностей с использованием наблюдений и краткосрочных прогнозов. Ассимиляция данных обычно представляет собой последовательную временную процедуру, в которой предыдущий прогноз модели сравнивается с вновь полученными наблюдениями, затем состояние модели обновляется с учетом наблюдений, инициируется новый прогноз и так далее. Этап обновления в этом процессе обычно называется анализом

Реанализ климата дает численное описание недавнего климата, полученное путем объединения моделей с наблюдениями. Он содержит оценки параметров атмосферы, таких как температура воздуха, давление и ветер на

разных высотах, а также параметров поверхности, таких как количество осадков, влажность почвы, высота океанских волн и температура поверхности моря. Оценки производятся для всех мест на Земле и охватывают длительный период времени, который может длиться несколько десятилетий и более. Повторный анализ климата генерирует большие наборы данных, которые могут занимать несколько петабайт пространства, и лучше всего обрабатывать их с помощью облачных инструментов, чтобы избежать больших объемов загрузки.

Современные тенденции моделирования атмосферных процессов предполагают учитывать при прогнозе все неопределённости, с которыми сталкиваются при разработке моделей. Поэтому на смену детерминированному прогнозу сегодня приходит прогноз ансамблевый.

Прогноз – это оценка будущего состояния атмосферы. Он создается путем оценки текущего состояния атмосферы с помощью наблюдений, а затем расчета того, как это состояние будет развиваться со временем, с использованием компьютерной модели численного прогноза погоды. Поскольку атмосфера является хаотичной системой, очень небольшие ошибки в ее начальном состоянии могут привести к большим ошибкам в прогнозе.

Это означает, что мы никогда не сможем создать идеальную систему прогнозирования, потому что мы никогда не сможем наблюдать каждую деталь исходного состояния атмосферы. Крошечные ошибки в начальном состоянии будут усиливаться, поэтому всегда существует предел того, насколько далеко вперед мы можем предсказать любую деталь.

Чтобы проверить, как эти небольшие различия в начальных условиях могут повлиять на результат прогноза, можно использовать ансамблевую систему для создания множества прогнозов.

Вместо запуска одного прогноза компьютерная модель запускается несколько раз с несколько разными начальными условиями. Полный набор

прогнозов называется ансамблем, а отдельные прогнозы в нем — членами ансамбля.

Системы ансамблевого прогнозирования спроектированы таким образом, чтобы вероятность каждого члена была одинаковой. Первоначальные различия между членами ансамбля невелики и согласуются с неопределенностями наблюдений. Но когда мы смотрим на несколько дней вперед, прогнозы могут быть совсем другими.

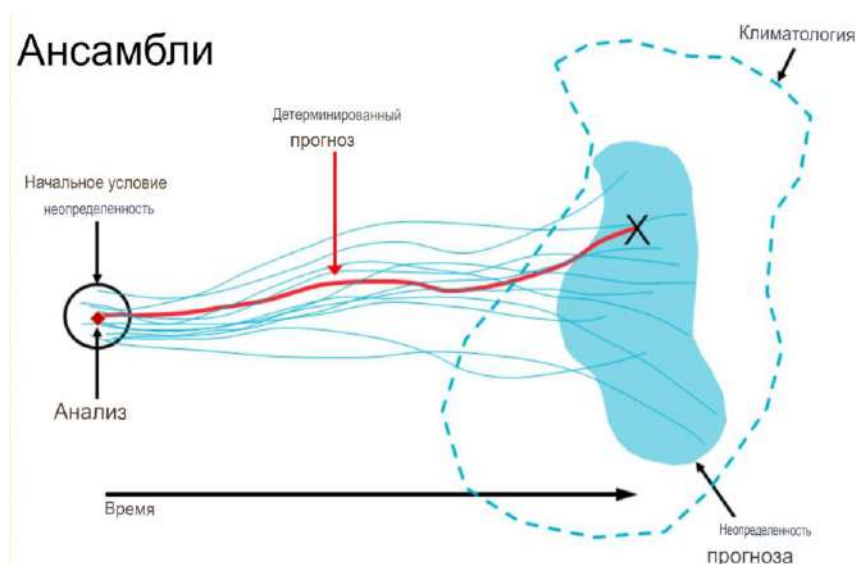


Рисунок 1.10 – Схематическое изображение технологии ансамблевого прогноза [6]

Ансамблевые прогнозы дают синоптику гораздо лучшее представление о том, какие погодные явления могут произойти в определенное время. Сравнивая эти разные прогнозы, синоптик может решить, насколько вероятным будет то или иное погодное явление. Если прогнозы сильно различаются, синоптик знает, что существует большая неопределенность относительно того, что на самом деле будет происходить с погодой, но, если все прогнозы очень похожи, у него будет больше уверенности в предсказании конкретного события.

2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОГНОЗОВ

Для планирования воздушного сообщения по маршрутам (экономическая целесообразность) и обеспечения безопасности исследовалось качество прогноза следующих метеорологических величин

Скорость ветра на изобарических поверхностях 200 и 250 гПа;

Максимальную скорость ветра в толще атмосферы от подстилающей поверхности до уровня 1 гПа;

Температуру воздуха на высоте 150 и 200 гПа;

Геопотенциальную высоту уровня максимального ветра;

Геопотенциальную высоту изобарических поверхностей 200 и 250 гПа.

Выбор изобарических поверхностей обусловлен диапазоном высот, которые чаще всего используются коммерческими авиалайнерами.

2.1 Оценка качества прогноза от 4 января на 72 часа

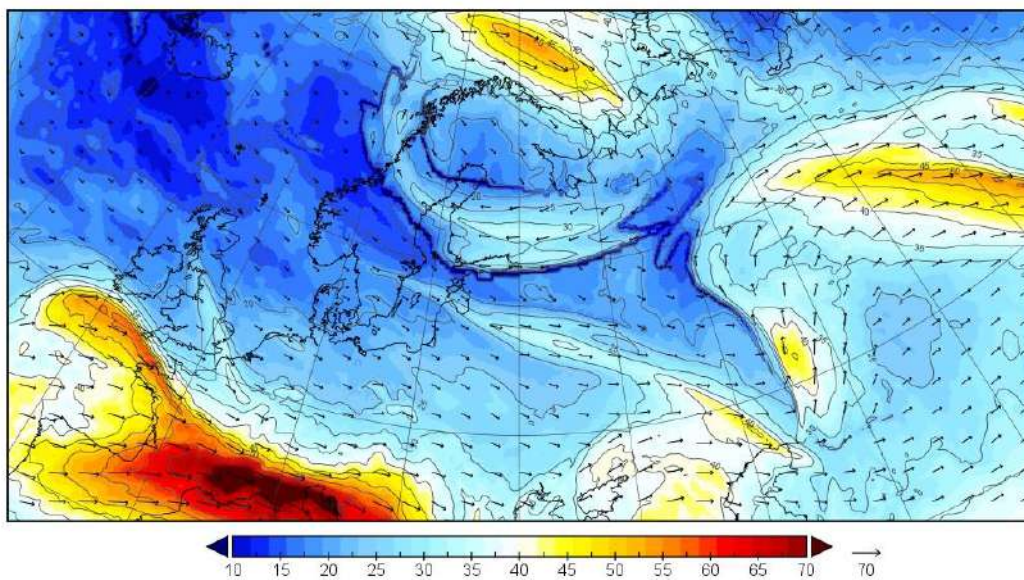
Для примера рассмотрим структуру атмосферы за 4 января 2024 г.

На рисунке 2.1 представлены модельное и фактическое поля максимальной скорости ветра.

Анализируя представленные поля можно сделать следующие выводы: модельные и фактические скорости примерно одинаковые и составляют приблизительно 52 м/с. При этом структура полей отличается – в прогностическом поле область высоких ветров занимает большую площадь и расположена севернее. При планировании полётов, например, из Санкт-Петербурга в восточные регионы России эта информация является актуальной для выбора маршрута с учётом наличия струйного течения – прогностическая

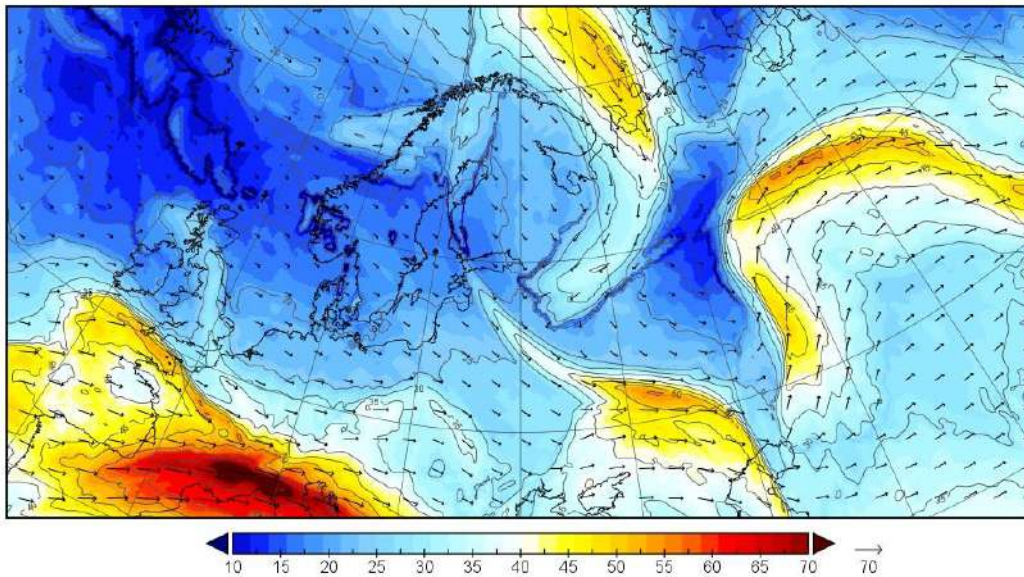
информация позволит осуществлять выбор маршрута с учётом наличия попутного струйного течения,

МАКСИМАЛЬНЫЙ ВЕТЕР, м/с.



а)

МАКСИМАЛЬНЫЙ ВЕТЕР, м/с.



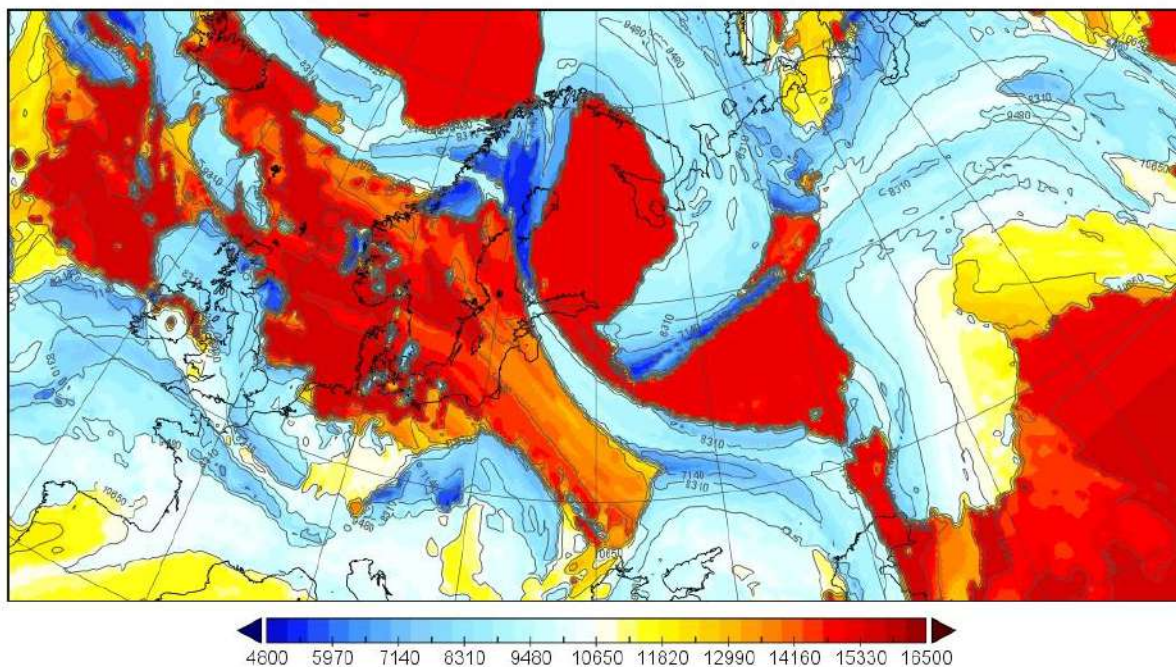
б)

Рисунок 2.1 – Поля фактической (а) и прогностической (б) скорости ветра

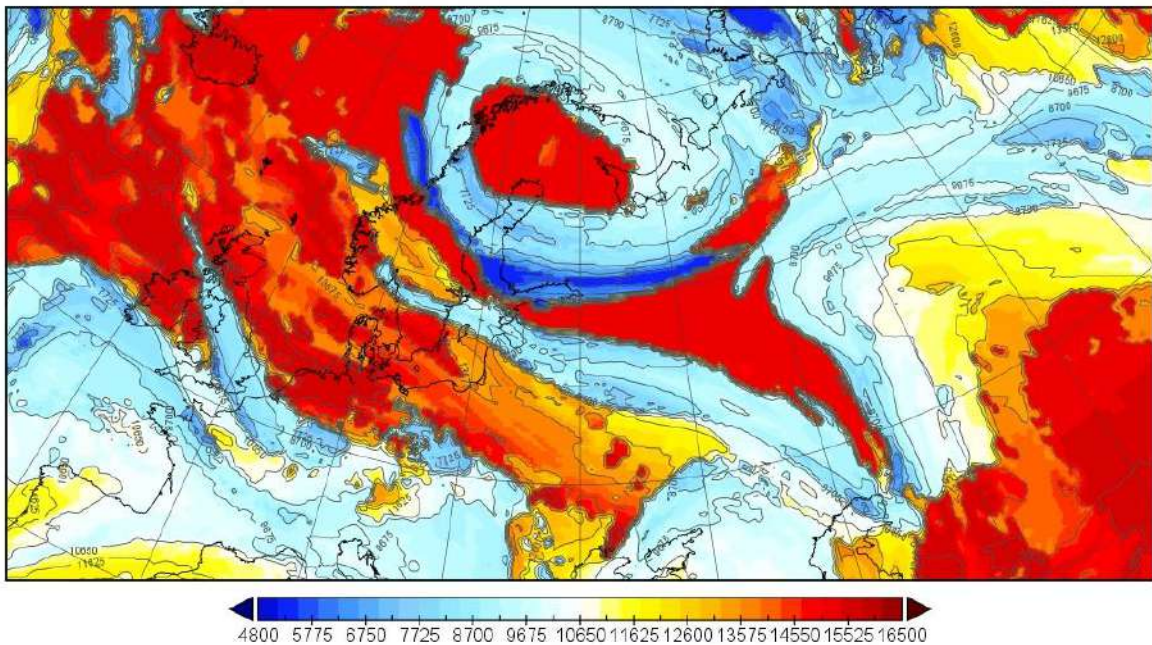
что позволит получить экономическую выгоду. При планировании обратного маршрута эта прогностическая информация позволит выбрать оптимальный маршрут для обхода зоны сильных ветров. Необходимо проложить маршрут или севернее или южнее, выше или ниже.

Возможность и планирование обхода зоны струйного течения можно оценить по прогностической карте высоты уровня максимального ветра, которая приведена на рисунке 2.2.

ГЕОПОНЕНЦИАЛЬНАЯ ВЫСОТА МАКСИМАЛЬНОГО ВЕТРА, метры.



ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ВЫСОТА МАКСИМАЛЬНОГО ВЕТРА, метры.



б)

Рисунок 2.2 – Поля фактической (а) и прогностической (б) геопотенциальной высоты уровня максимального ветра

Диапазон высот максимального ветра – фактического и прогностического – совпадают – от 4800 до 16500, но структура поля разная, особенно в области Санкт-Петербурга. Об этом можно судить по ошибке прогноза геопотенциальной высоты, которая представлена на рисунке 2.3. Ошибка прогноза находится в диапазоне от -5 км до 5 км. Но ошибки прогноза связаны не с областью струйного течения, а с областями не очень сильных ветров (10 – 25 м/с), поэтому информация о высоте струйного течения может быть полезной.

РАЗНИЦА ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВЫСОТ МАКСИМАЛЬНОГО ВЕТРА, метры.

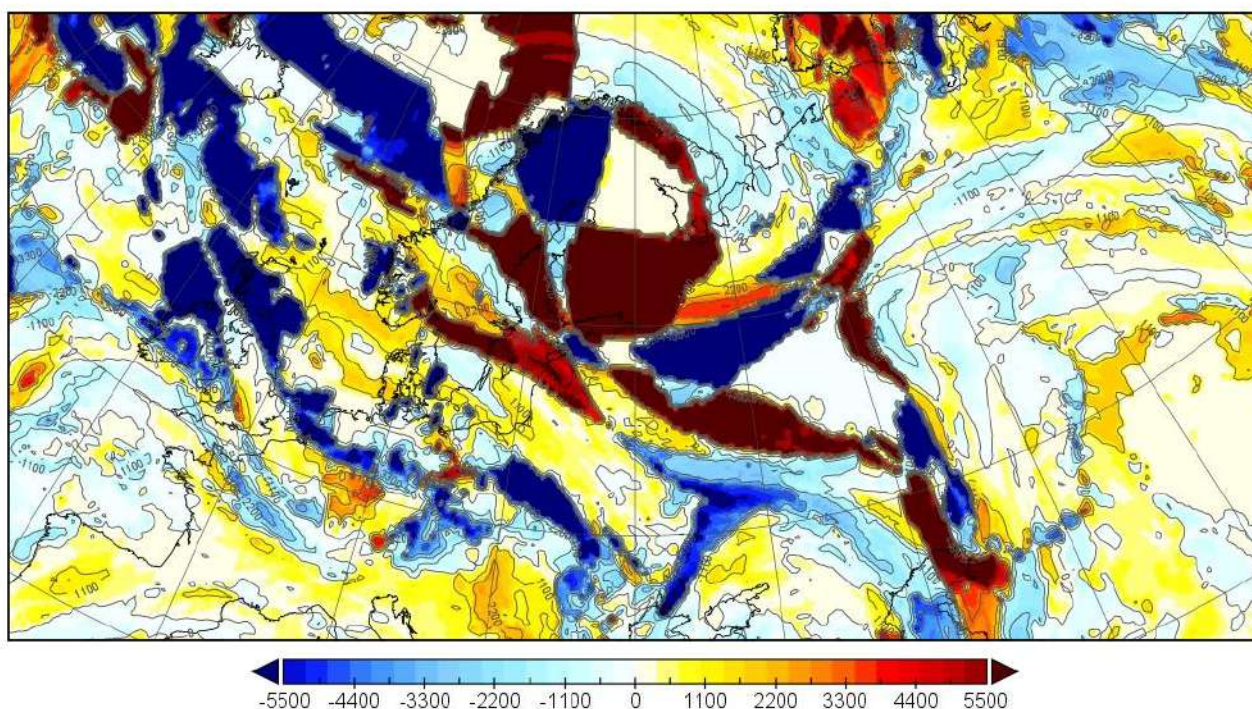


Рисунок 2.3 – Ошибка прогноза геопотенциальной высоты уровня
максимального ветра

Для метеорологического обеспечения полётов метеорологам необходима информация о высотах изобарических поверхностей. На рисунке 2.4 представлен вертикальный разрез ошибок прогноза геопотенциальной высоты изобарических поверхностей.

Анализ поля ошибок позволяет говорить о том, что прогноз высоты изобарической поверхности точен – максимальная ошибка составляет 150 м для уровня 400 гПа, что меньше 3%.

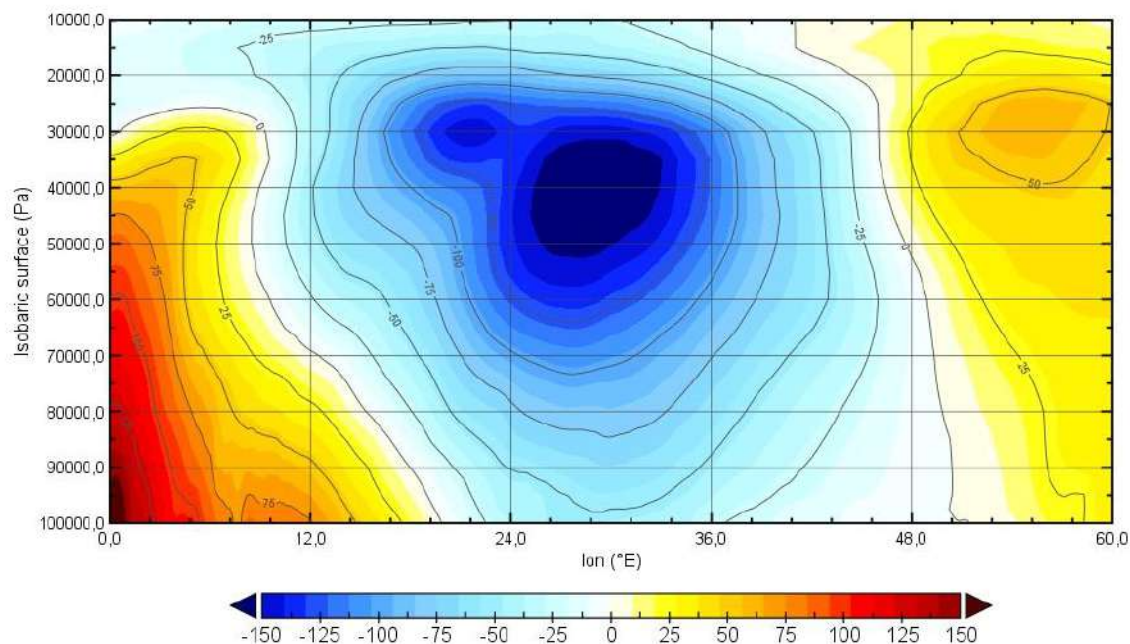
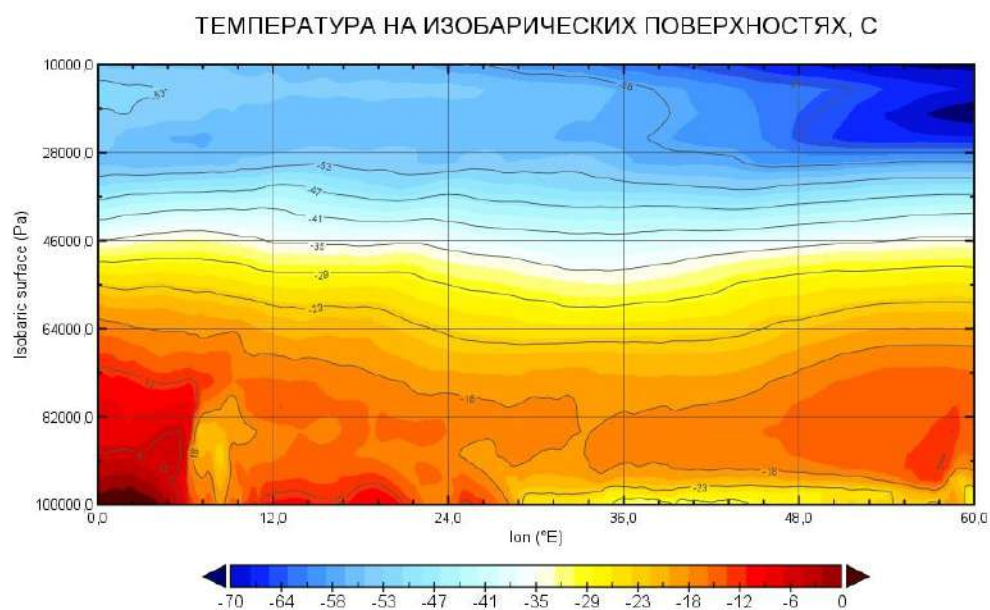


Рисунок 2.4 – Вертикальный разрез ошибки прогноза геопотенциальной высоты изобарических поверхностей

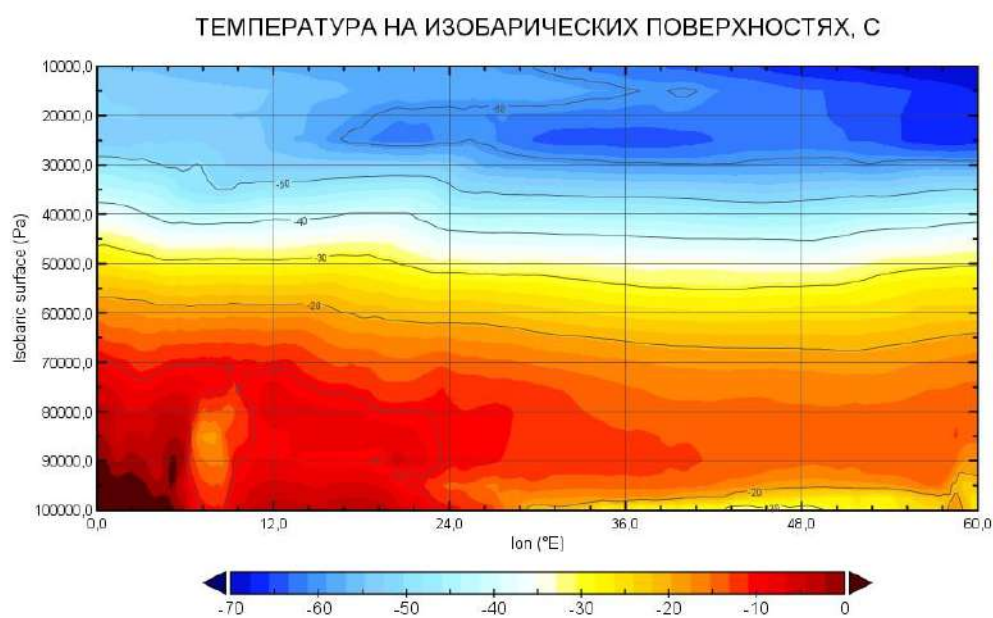
Важным фактором, влияющим на эффективность полётов, является температура воздуха. Низкие значения температуры воздуха (ниже 70°C , это характеристика прописана в инструкции полётной эксплуатации конкретного воздушного судна) могут быть фактором, который способствует кристаллизации топлива, что может приводить к увеличению расхода топлива и повышенной нагрузке на системы самолёта. При попадании летательного аппарата в области чрезмерно низких значений температуры воздуха самолёт может потребовать изменение эшелона. Этот фактор особенно важен при осуществлении полётов в северных регионах.

На рисунке 2.5 представлен вертикальный разрез температуры воздуха вдоль широты Санкт-Петербурга (60° с.ш.).

В фактическом поле на долготе 60^0 в.д. наблюдаются значения температуры воздуха ниже 70^0C на высоте около 200 гПа. В прогностическом поле таких значений температуры воздуха нет. Вертикальный разрез ошибки прогноза представлен на рисунке 2.6. Анализируя поля ошибок можно сказать об ошибке 6^0C на высоте около 200 гПа. Такая ошибка может быть критичной для планирования полётов. Например, при использовании данных моделирования при планирования полётов, получив прогноз температуры -70^0C и, учитывая, что ошибка может составлять 6^0C , авиакомпания должна понимать, что возможна температуры воздуха -76^0C и надо над данной территорией запланировать более низкий эшелон полёта или учесть возможность ошибки прогноза температуры воздуха в 6^0C и риски с этим связанные.



a)



б)

Рисунок 2.5 – Вертикальный разрез температуры воздуха вдоль широты 60⁰ с.ш.. Фактический (а) и прогностический (б)

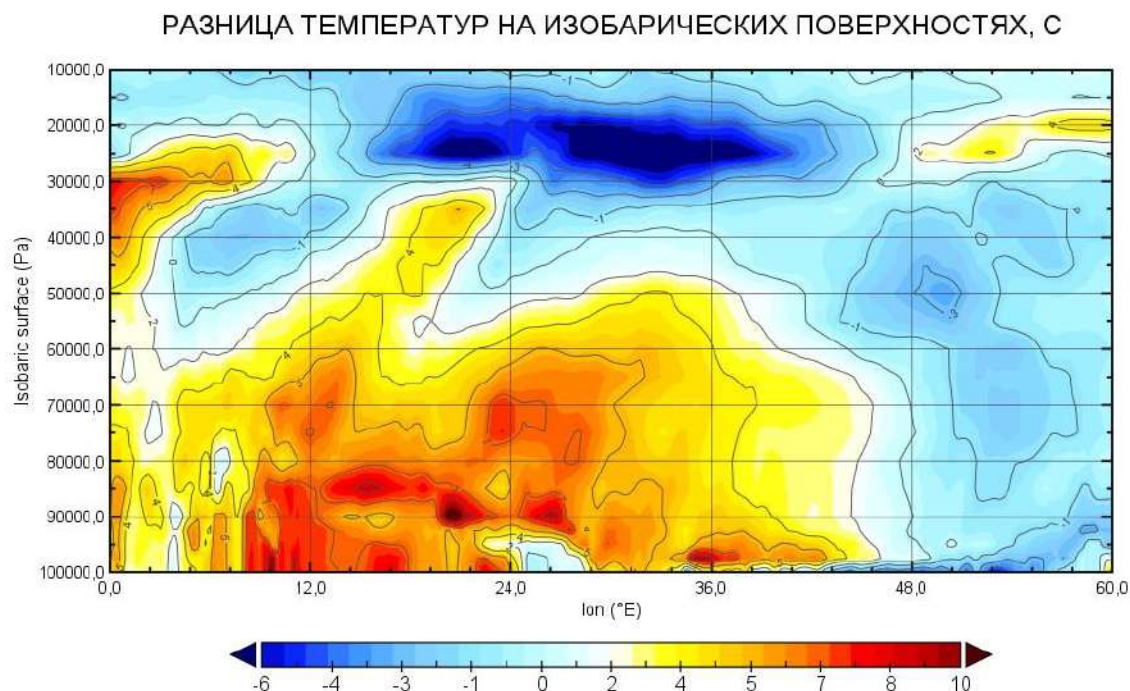
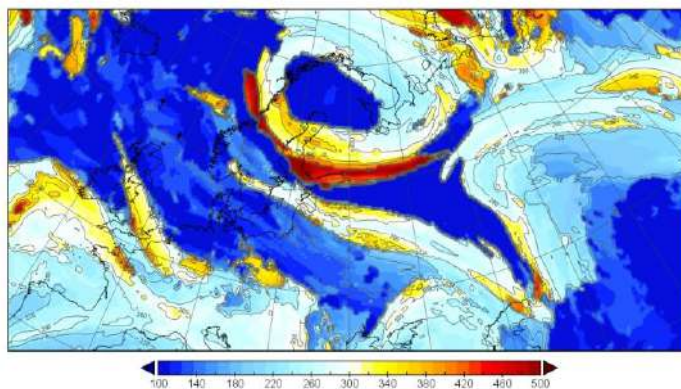


Рисунок 2.6 – Вертикальный разрез поля ошибки температуры воздуха

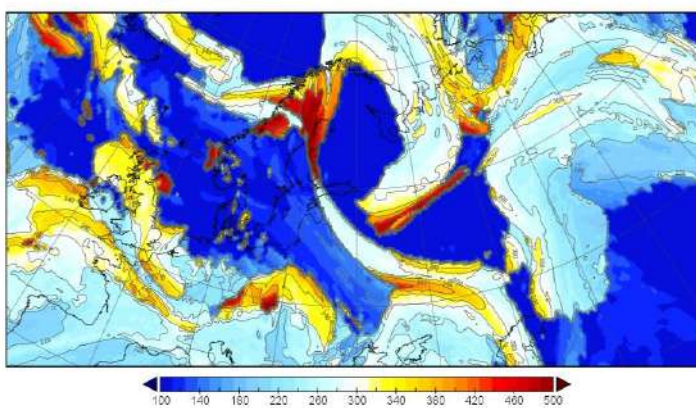
Рассмотрим более детально прогноз температуры воздуха на изобарических поверхностях 200 и 150 гПа. Рассматриваем именно эти поверхности так как в анализируемой ситуации струйное течение находится между этими уровнями – об этом факте можно судить по прогностическому и фактическому полям давления на уровне максимального ветра, которые приведены на рисунке 2.7. В ошибке прогноза давления чётко прослеживается ошибка описания местоположения области максимального ветра, которая наиболее значима в регионах за пределами струйного течения.

ДАВЛЕНИЕ НА УРОВНЕ МАКСИМАЛЬНОГО ВЕТРА, гПа.



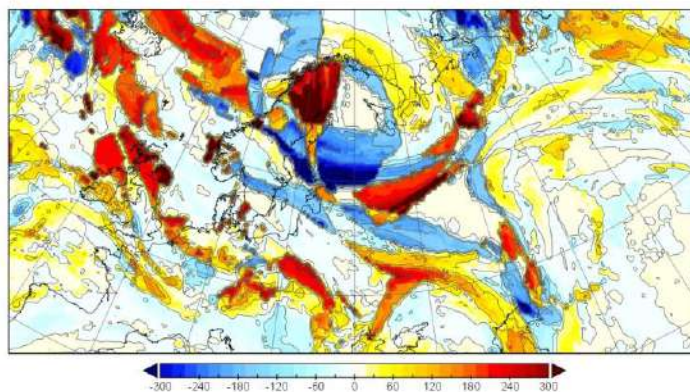
а)

ДАВЛЕНИЕ НА УРОВНЕ МАКСИМАЛЬНОГО ВЕТРА, гПа.



б)

Разница между фактическим и прогностическим давлением на уровне максимального ветра, гПа.



в)

Рисунок 2.7 – Фактическое (а) и прогностическое (б) поля давления уровня максимального ветра и ошибка прогноза (в)

На рисунке 2.8 приведены прогностические и фактические поля температуры воздуха, а на рисунке 2.9 – поле ошибок прогноза прогноза температуры воздуха.

Приведённые поля подтверждают ранее сделанное заключение о том, что при неплохом воспроизведении структуры поля температуры воздуха (наличия и местоположения очагов тепла и холода), возникают ошибки в значениях и они могут достигать 6°C в некоторых, небольших по площади, регионах.

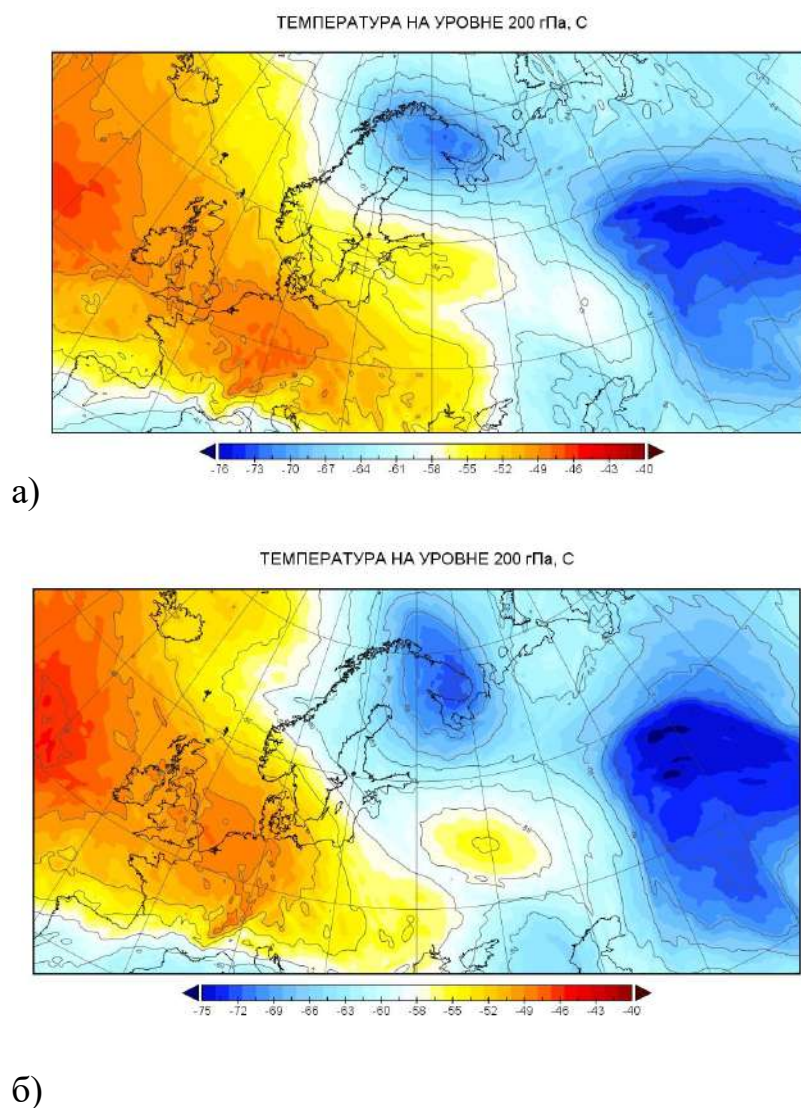


Рисунок 2.8 – Фактическое (а) и прогностическое (б) поля температуры воздуха на изобарической поверхности 200 гПа

РАЗНИЦА ТЕМПЕРАТУР НА УРОВНЕ 200 гПа, С

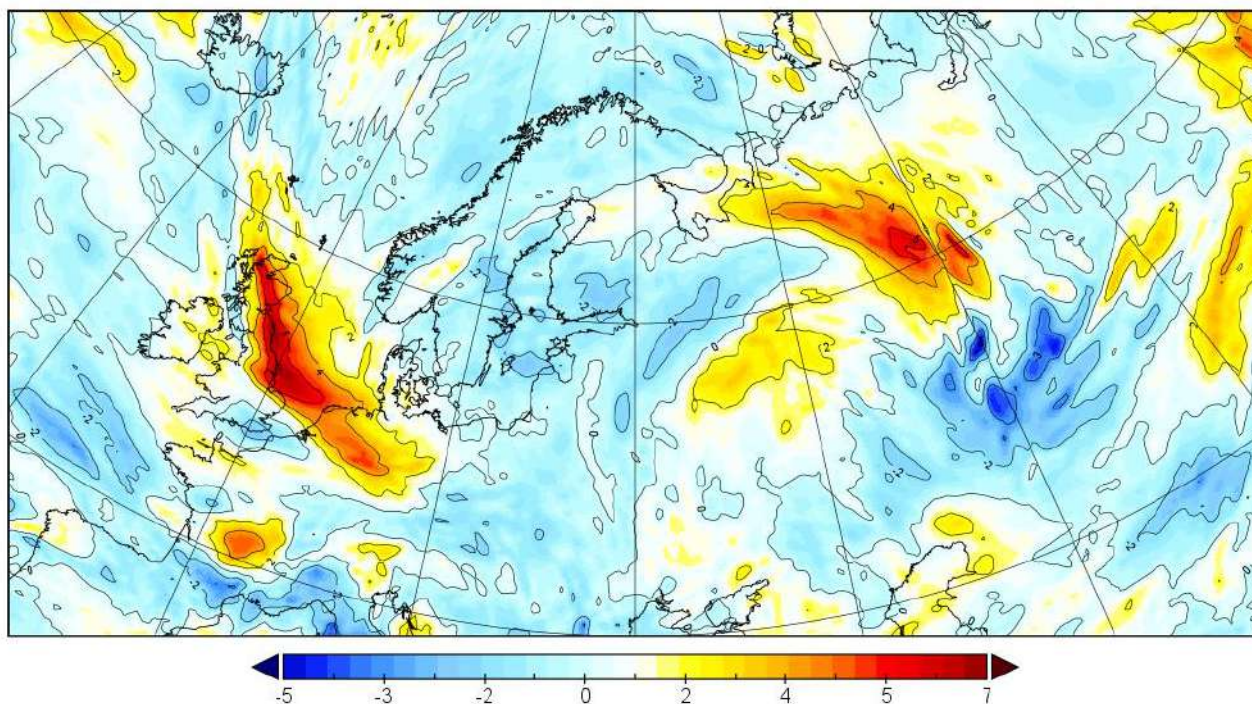
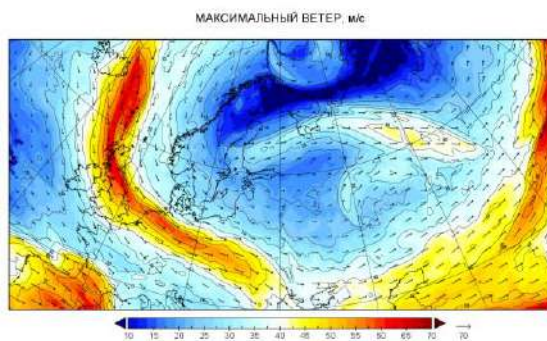


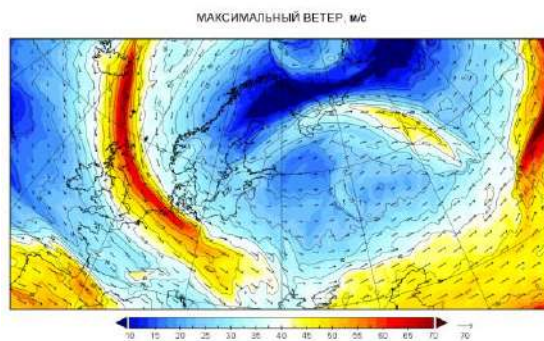
Рисунок 2.9 – Поле ошибок прогноза температуры воздуха на уровне 200 гПа

2.2 Анализ данных за 15 января на 72 часа.

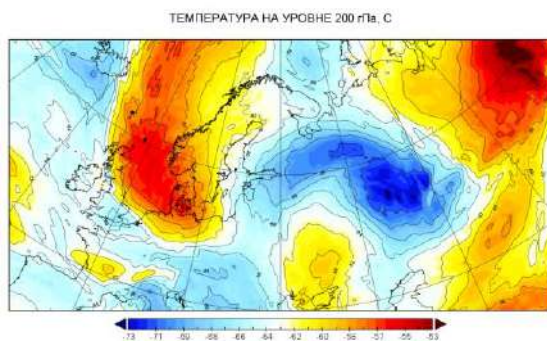
Проанализируем ситуацию 15 января 2024 года. Фактические и прогностические поля максимального ветра и температуры воздуха приведены на рисунке 2.10, а поля геопотенциальной высоты на рисунке 2.11.



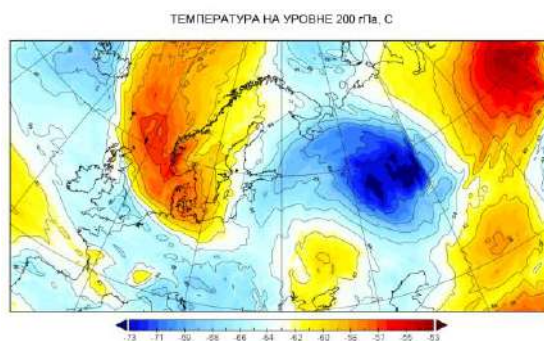
а)



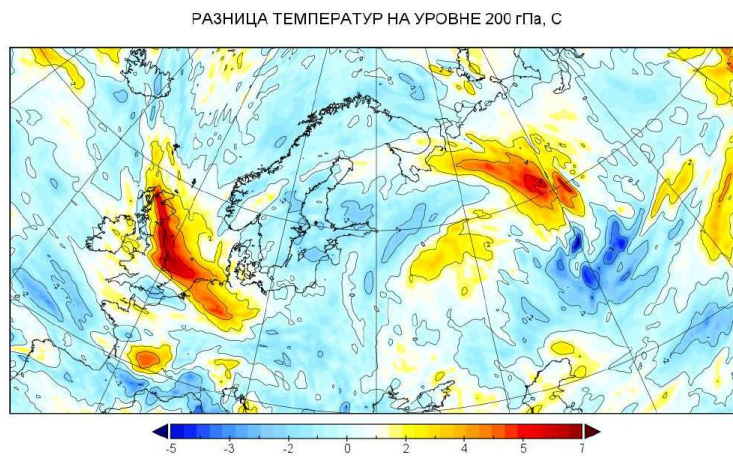
б)



в)

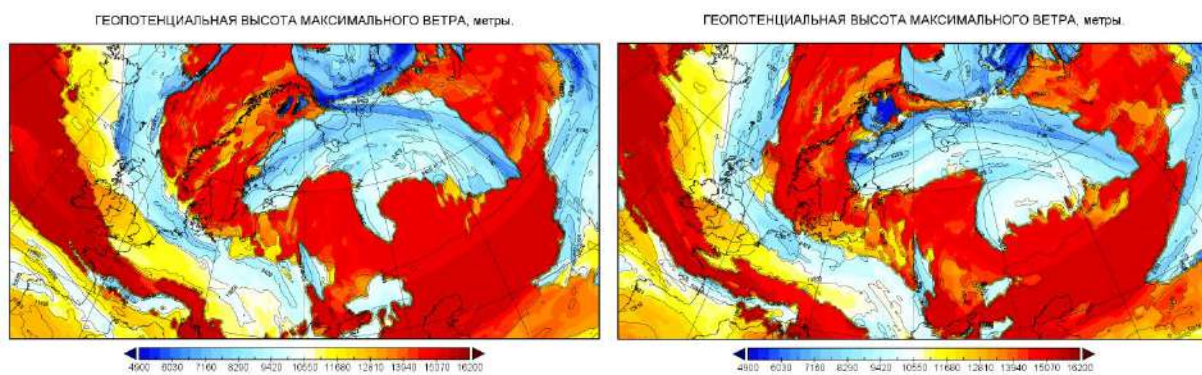


г)



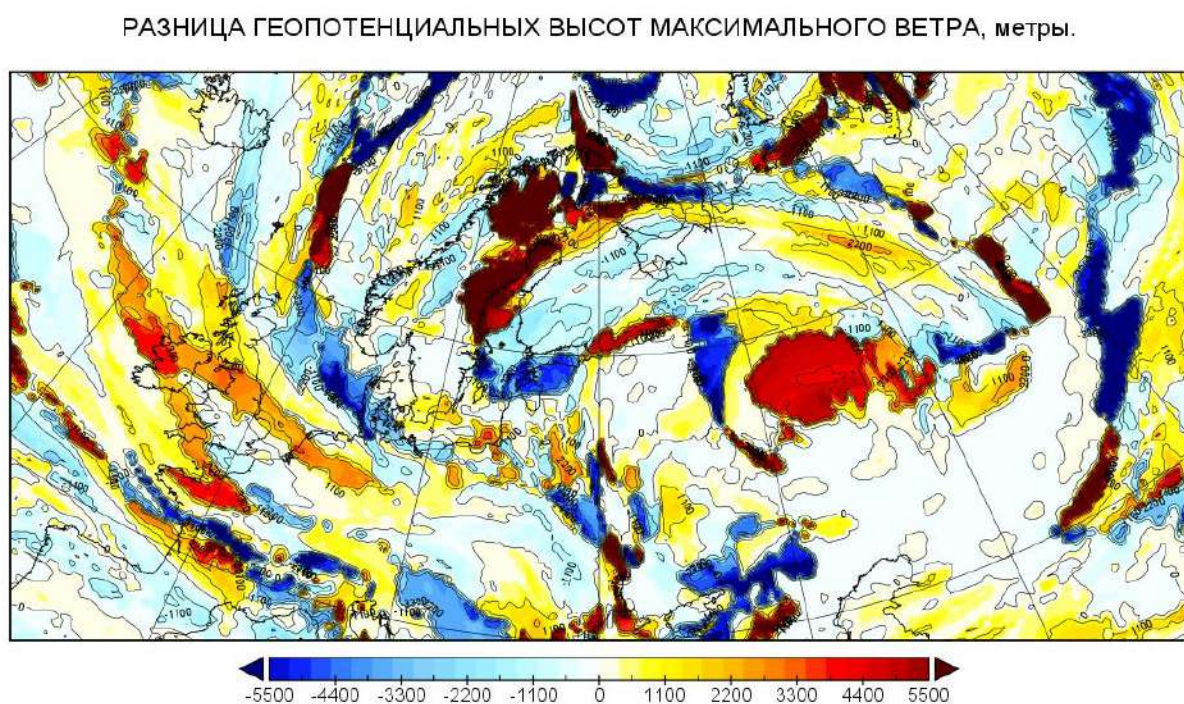
д)

Рисунок 2.10 – Поля фактической (а) и прогностической (б) скорости максимального ветра, фактическое (в) и прогностическое (г) поля температуры воздуха на изобарической поверхности 200 гПа, поле ошибок (д) прогноза температуры воздуха на уровне 200 гПа



а)

б)



в)

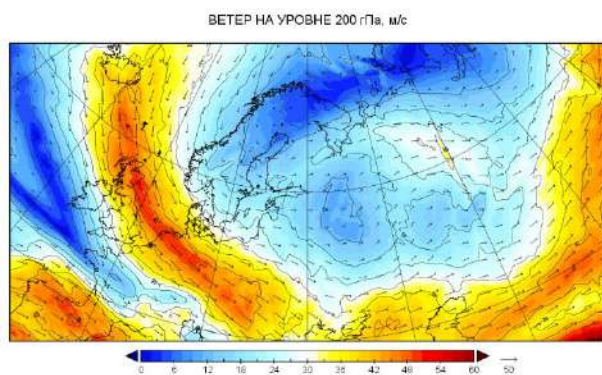
Рисунок 2.11 – Поля фактической (а) и прогностической (б) геопотенциальной высоты уровня максимального ветра и ошибка прогноза геопотенциальной высоты уровня максимального ветра (в)

Анализируя результаты, приведённые на рисунке 2.10 можно подтвердить выводы, сделанные ранее:

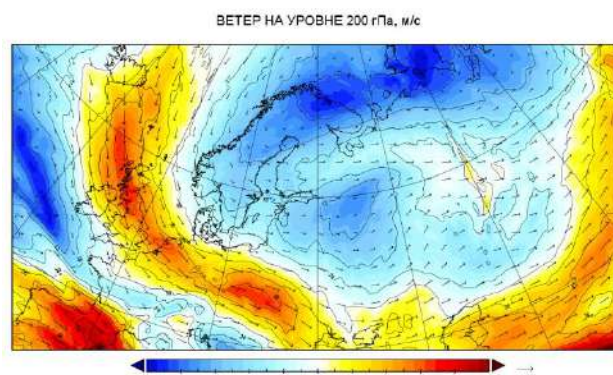
- модель с достаточной точностью прогнозирует скорость и местоположение области высокой скорости ветра;
- ошибки прогноза температуры в средней атмосфере составляют по абсолютной величине около 6°C ;
- прогноз геопотенциальной высоты изобарических поверхностей имеет ошибки, связанные с местоположением барических образований, и это объясняет большие значения абсолютной ошибки, которая может достигать 5 км.

Рассмотрим для этого срока прогноз струйного течения. Стандартно струйное течение определяют по изобарической поверхности 300 гПа. Результаты модельного прогноза позволяют выбрать более точное расположение струйного течения, что важно при планировании маршрута полёта. На рисунке 2.12 представлено поле скорости ветра на изобарических поверхностях 300, 250 и 200 гПа.

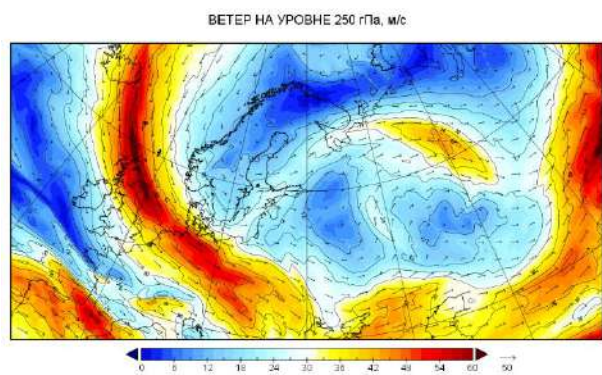
Анализируя результаты прогноза скорости ветра можно сделать вывод о том, что струйное течение расположено между поверхностями 300 и 250 гПа. На этапе планирования необходимо учитывать эти данные при планировании полётов из Санкт-Петербурга в восточные регионы для обеспечения экономической эффективности – маршрут полёта эффективнее планировать в этом вертикальном диапазоне. При полётах из восточных регионов в Санкт-Петербург, согласно прогностической информации, нужно учитывать, что на уровне 200 гПа ветер восточного направления более слабый, что позволит выполнить полёт на этой высоте при более оптимальных условиях и сократить затраты.



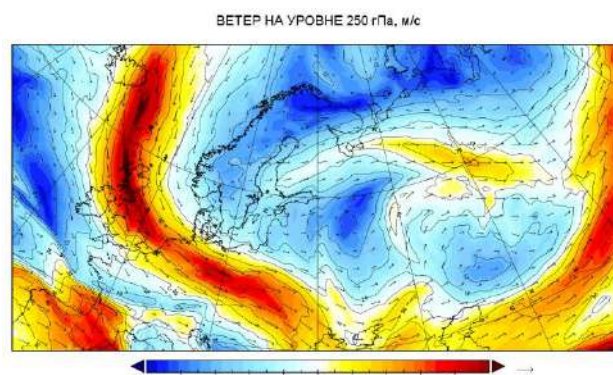
а)



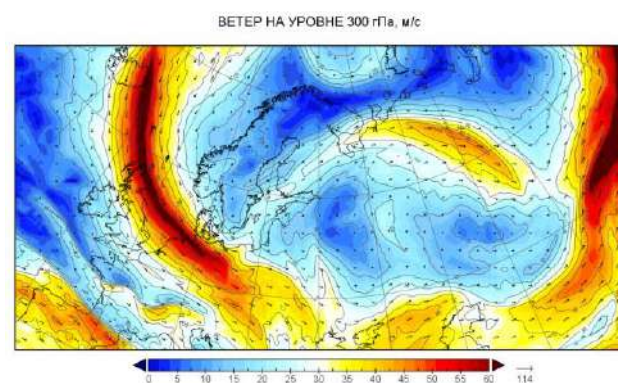
б)



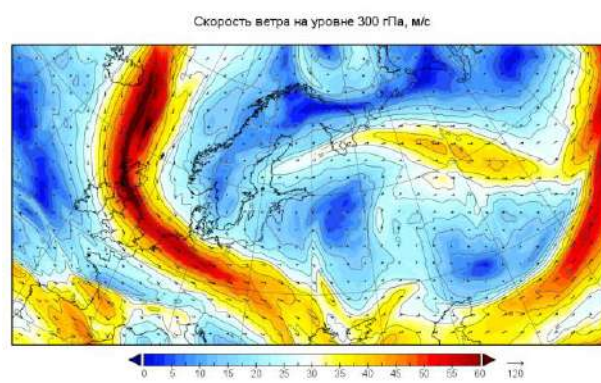
в)



г)



д)

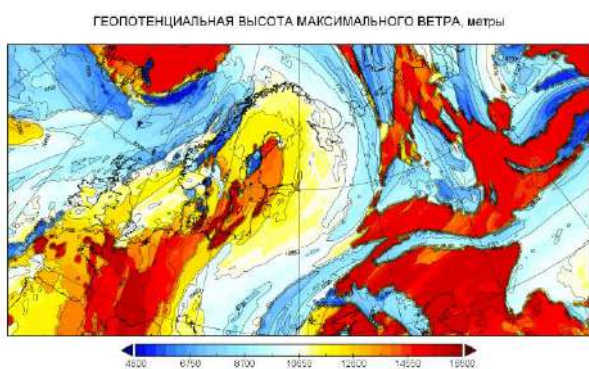


е)

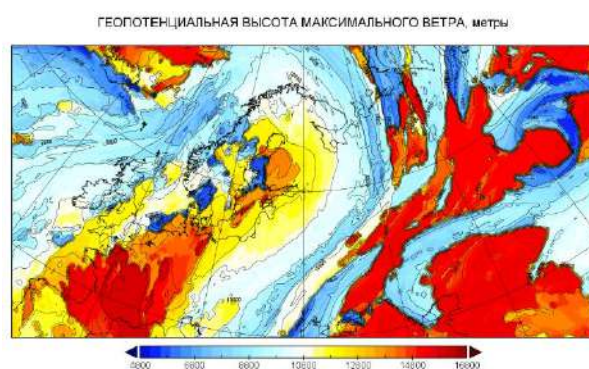
Рисунок 2.12 – Поле прогностического и фактического ветра на изобарических поверхностях 200 гПа (а, б), 250 гПа (в, г), 300 гПа (д,е)

2.3. Анализ прогностических и фактических данных 26 января

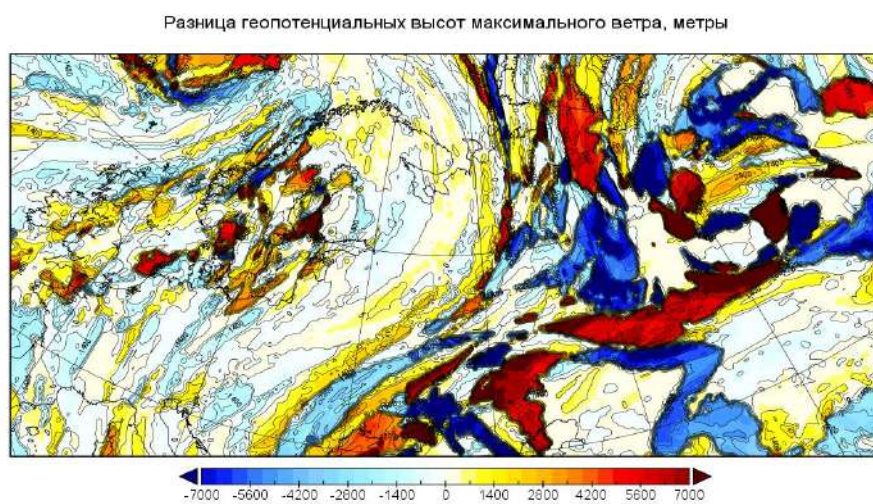
Проанализируем ситуацию 29 января 2024 года. Также как и в предыдущем рассмотренном случае прогноз геопотенциальной высоты изобарических поверхностей имеет ошибки, связанные с местоположением барических образований и это объясняет большие значения абсолютной ошибки, которая может достигать 7 км.



а)



б)

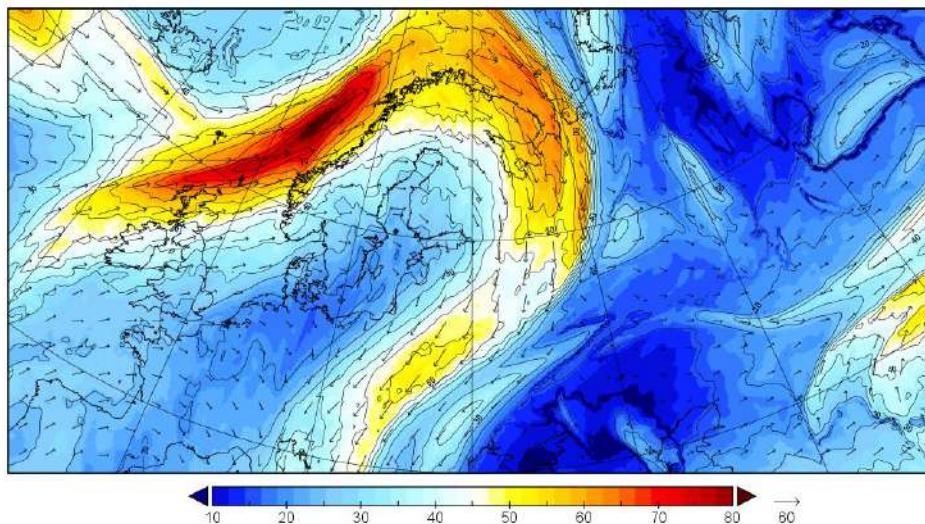


в)

Рисунок 2.13 Поля фактической (а) и прогностической (б) геопотенциальной высоты уровня максимального ветра и ошибка прогноза геопотенциальной высоты уровня максимального ветра (в)

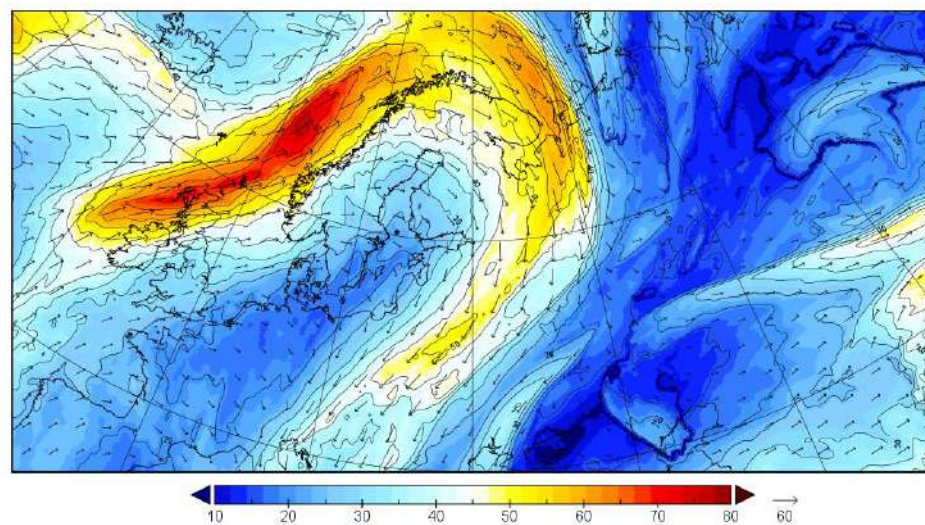
Анализируя представленные поля максимального ветра (рисунок 2.14) можно сделать следующие выводы: также как и в предыдущие сроки наблюдения, модельные и фактические скорости, в интересующем нас районе, примерно одинаковые около 60 м/с. Но в данной ситуации особенностью является, то что воздушный поток ориентирован преимущественно с севера на юг. И данный сильный ветер может оказаться преимуществом при полетах, например, из Канады в Индию. Но вместе с тем в обратном направлении из Индии в Канаду, чтобы минимизировать влияние встречного ветра, который может сильно уменьшить путевую скорость воздушного судна, тем самым увеличив время полета и уменьшив топливную эффективность, эту информация будет учитываться и полет может быть запланирован по более восточному маршруту, где скорость ветра незначительна.

МАКСИМАЛЬНЫЙ ВЕТЕР, м/с



а)

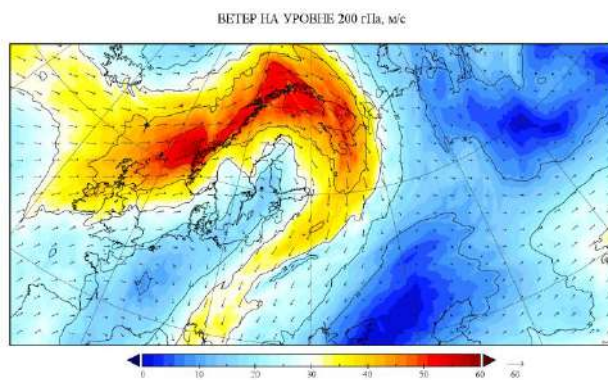
МАКСИМАЛЬНЫЙ ВЕТЕР, м/с



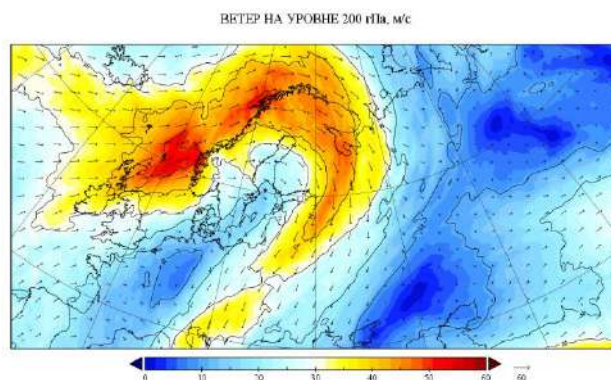
б)

Рисунок 2.14 Поля фактической (а) и прогностической (б) скорости максимального ветра

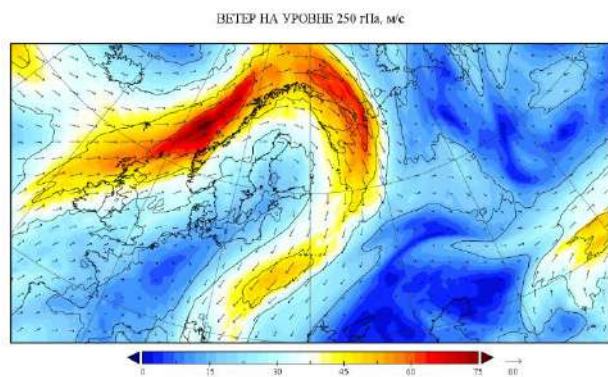
Если вернуться к предыдущим рассмотренным случаям, таким как полеты из Санкт-Петербурга в восточные регионы и обратно, то необходимо более детально рассмотреть ветер на изобарических поверхностях 200, 250 и 300 гПа (рисунок 2.15), так как именно на этих уровнях проходит наибольшая часть авиационного трафика. Наличие струйного течения прослеживается на всех трех уровнях. Данное струйное течение не будет являться преимуществом при полетах в восточном направлении и обратно, к тому же оно будет определять сильную боковую составляющую ветра и, скорее всего, в данном районе возможна турбулентность. Проанализировав данные о ветре на всех трёх уровнях, можно сделать вывод, что наименьшее влияние данное струйное течение будет оказывать на воздушное судно при полёте на уровне 200 гПа, следовательно, авиакомпания будет планировать более высокий эшелон полета на данном участке или экипаж при необходимости запросит у службы УВД изменение эшелона полета.



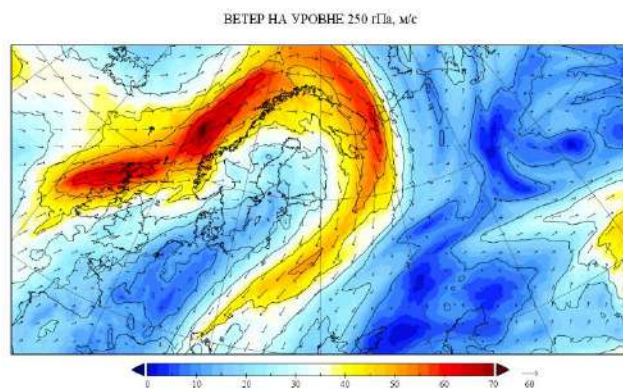
а)



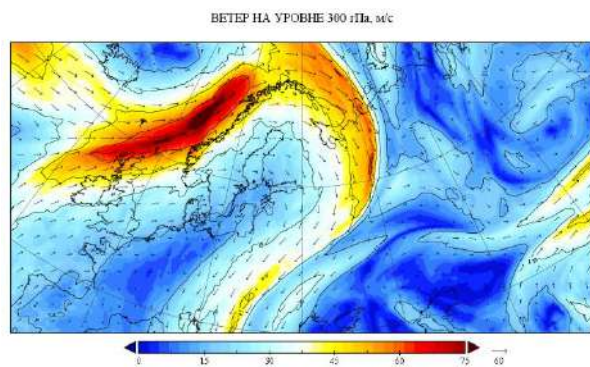
б)



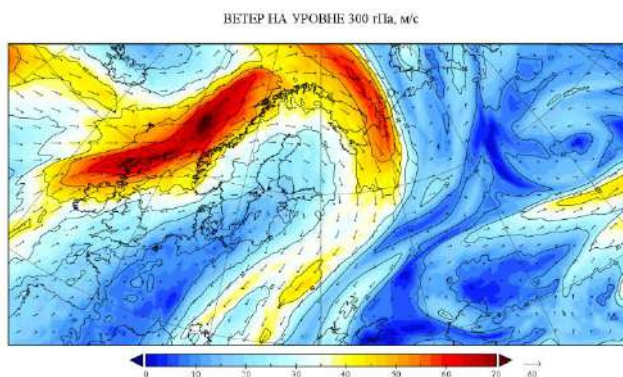
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.15 Поле прогностического и фактического ветра на изобарических поверхностях 200 гПа (а, б), 250 гПа (в, г), 300 гПа (д, е)

2.3. Вспомогательные прогностические характеристики.

Кроме основных метеорологических величин, которые проанализированы ранее, гидродинамические модели атмосферы предоставляют множество других характеристик атмосферы. Например, рассматриваемая в данном исследовании модель GFS, позволяет получить 125 характеристик атмосферы. В Приложении 1 приведены скриншоты интерфейса программы Raportly, позволяющие увидеть рассчитываемые при моделировании и доступные для использования метеорологические величины.

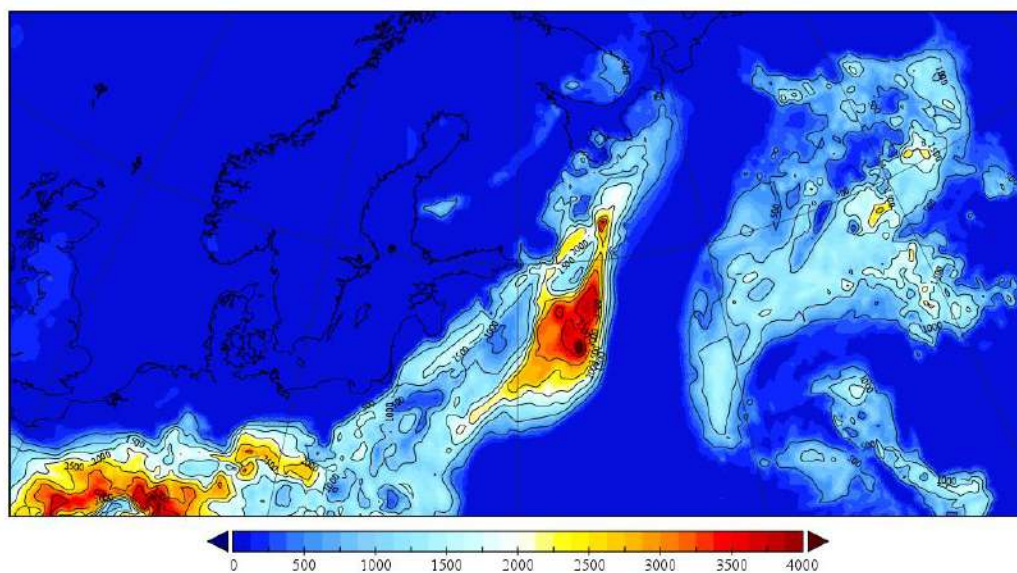
В качестве дополнения, рассмотрим также такой параметр, как индекс CAPE.

Доступная конвективная потенциальная энергия (CAPE), иногда просто доступная потенциальная энергия (APE), представляет собой потенциальную энергию атмосферы и может быть индикатором формирования конвективных облаков и штормов. CAPE фактически является индикатором атмосферной неустойчивости, что делает его очень ценным при прогнозировании суровых погодных условий. Значения от 1000 до 2000 могут указывать на формирование умеренных гроз и более 2000 сильных.

На рисунке 2.15 представлены прогностические (а) и фактические (б) поля индекса CAPE, здесь рассмотрен прогноз на 36 часов от 16 августа 2023 года. Данная информация вполне может быть использована, как вспомогательная, в дополнение к информации наземным ДМРЛ и метеорологическим локаторам на борту воздушного судна. Воздушное пространство между Санкт-Петербургом и Москвой является одним из наиболее загруженных на территории Российской Федерации. Так же эта информация может быть актуальной при полетах в Калининград, так как в связи с геополитической ситуацией единственный

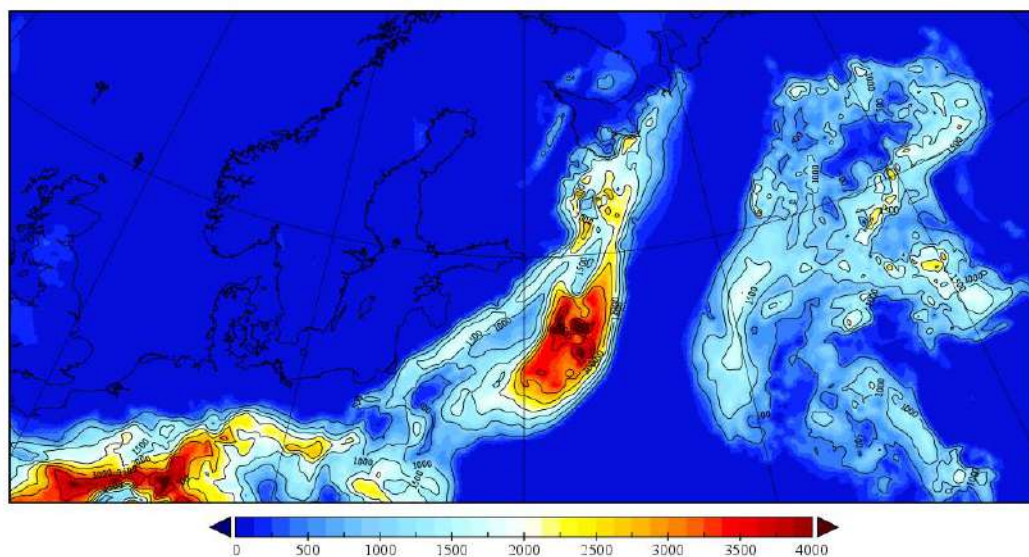
маршрут в Калининград проходит через нейтральные воды Балтийского моря. И наличие мощных конвективных облаков в данной зоне может являться препятствием для выполнения таких полетов.

ИНДЕКС CAPE, дж/кг



а)

ИНДЕКС CAPE, дж/кг



б)

Рисунок 2.15 – Индекс CAPE прогностические (а) и фактические (б) данные

Полезной для метеорологического обеспечения полётов может быть характеристика покрытия земной поверхности льдом (рисунок 2.16) и толщина этого льда (рисунок 2.17).

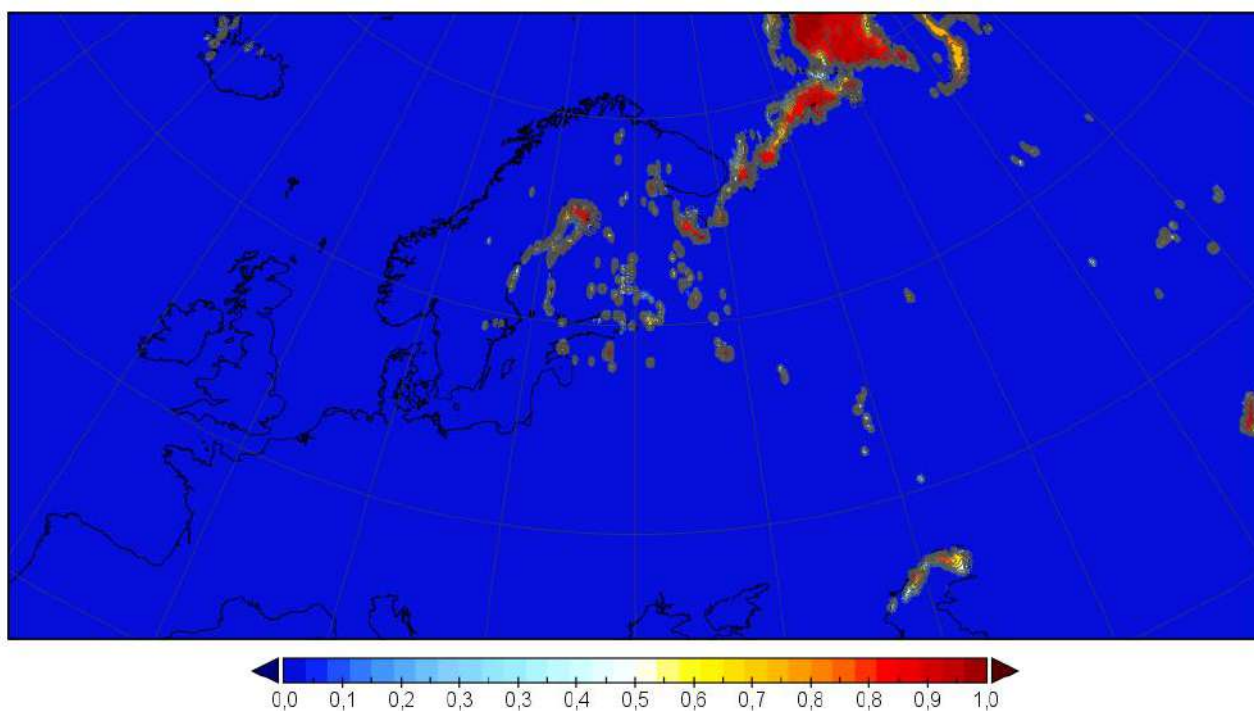


Рисунок 2.16 – Покрытие поверхности льдом

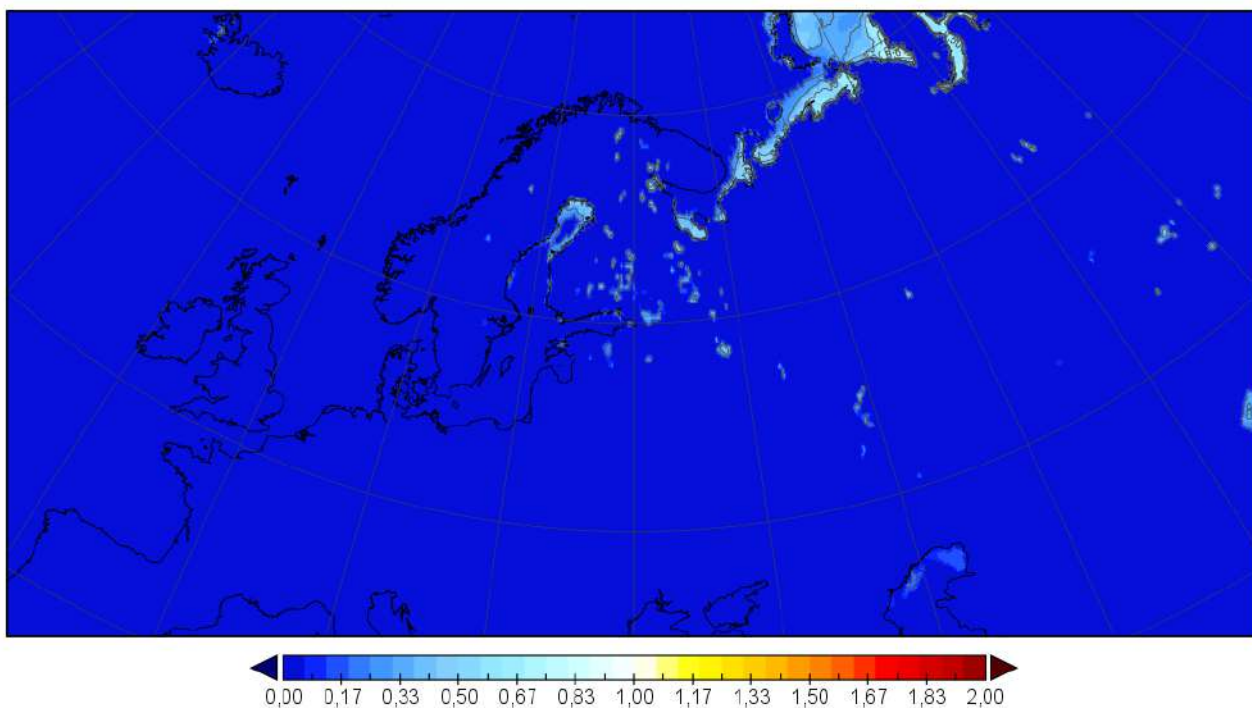


Рисунок 2.17 – Толщина слоя льда на поверхности

При этом ошибки прогноза покрытия поверхности льдом очень малы. На рисунке 2.18 представлена ошибка прогноза толщины ледового покрытия и из анализа поля ошибки толщины льда видно, что она составляет несколько процентов.

Ice thickness @ Ground or water surface

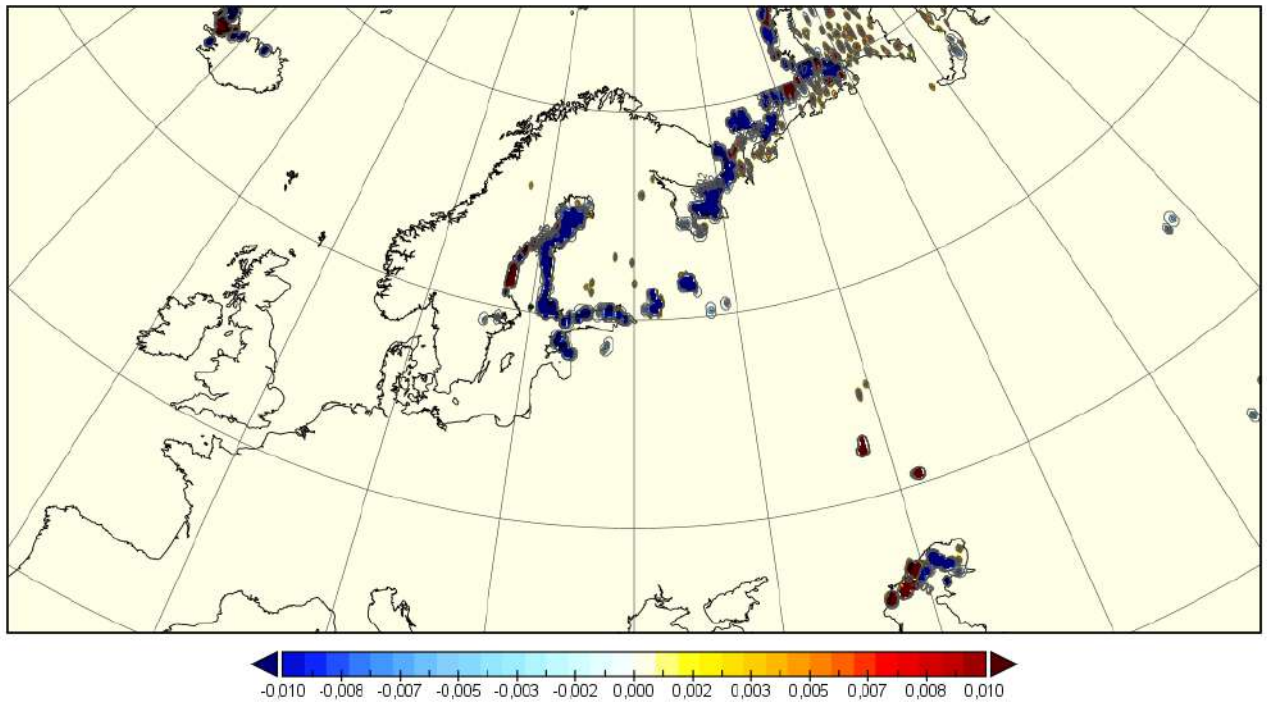
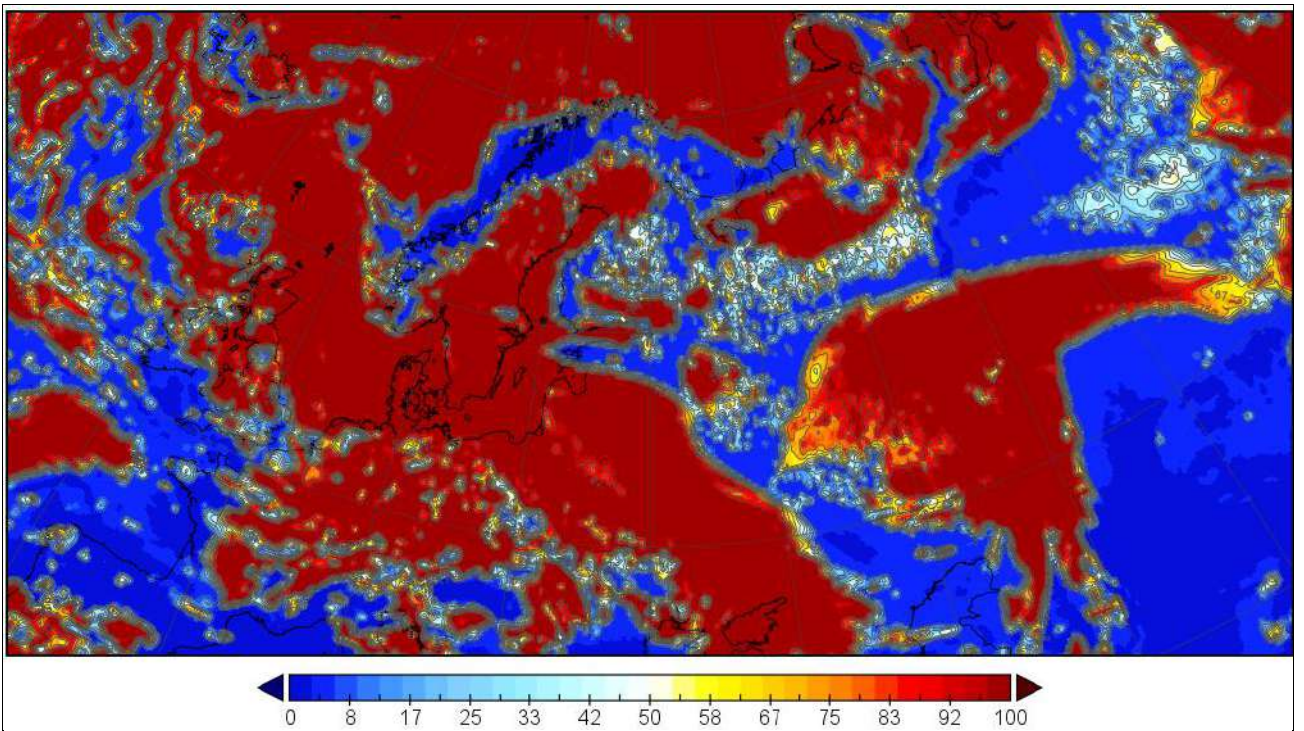
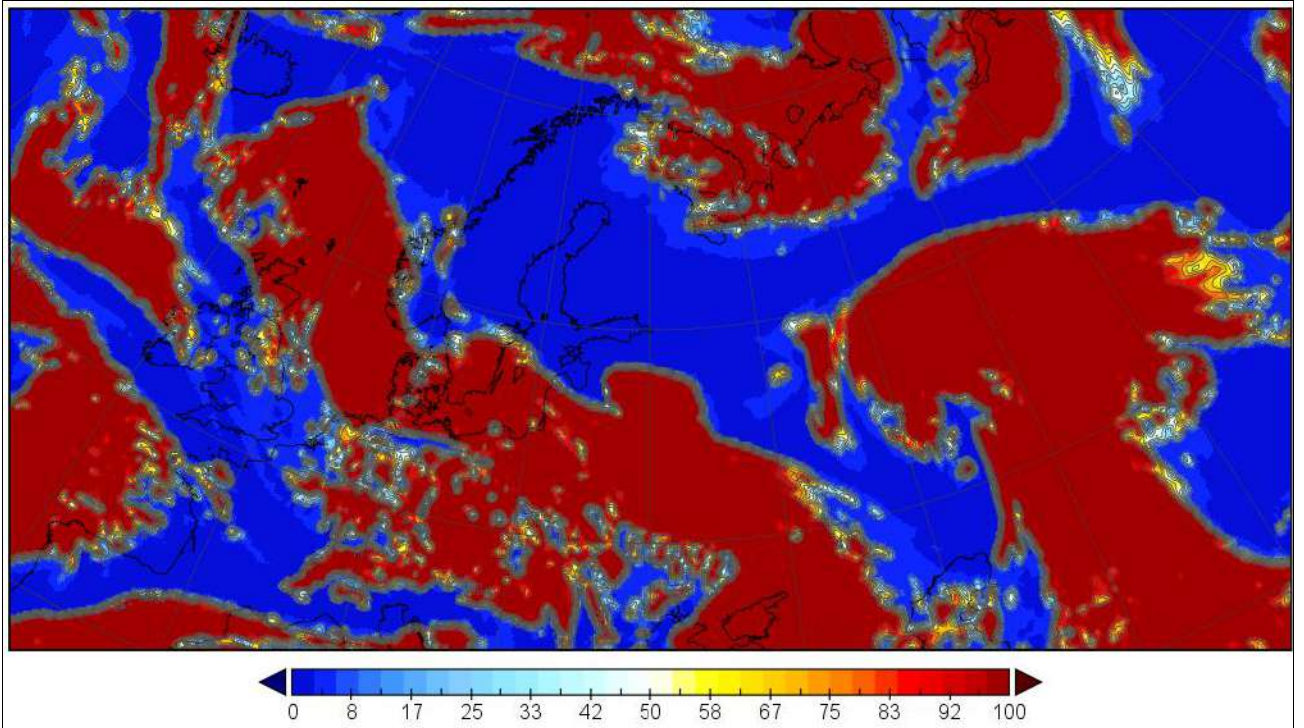


Рисунок 2.18 – Ошибка прогноза толщины льда на поверхности

Также из результатов моделирования можно получить балл облачности нижнего, среднего и верхнего яруса (рисунок 2.19), характеристики влажности, осадков (количество и форма дождь/снег), покрытие поверхности снегом.



a)



b)

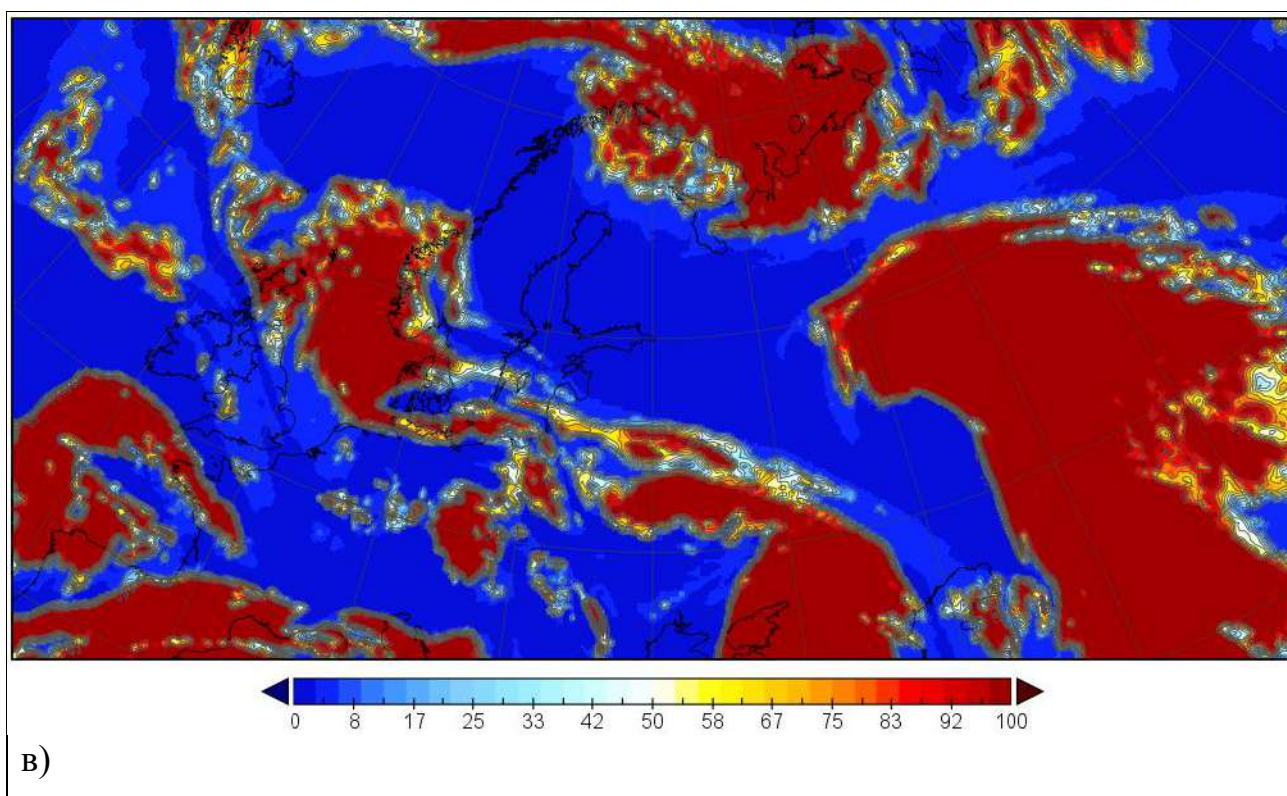


Рисунок 2.19 – Прогностический балл облачности нижнего (а), среднего (б) и верхнего (в) яруса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Через территорию Российской Федерации проходят трансполярные маршруты из Азии и Ближнего Востока в Северную Америку, а также маршруты, связывающие Китай и Европу. Исходя из сложившейся геополитической обстановки преимущество получили крупные авиакомпании из Китая, Индии, ОАЭ. В данной работе использованы данные модели GFS. Но крупные перевозчики имеют доступ к большему объему данных и могут использовать ансамблевые прогнозы, для получения более высокой точности при оценке метеопараметров. Полеты через территорию РФ и так являются конкурентным преимуществом, а владение точными данными о состоянии атмосферы, о положении и параметрах струйного течения, о наличии ОМЯ будут дополнять это преимущество.

В данной работе рассмотрены результаты гидродинамического прогноза, которые могут быть использованы при метеорологическом обеспечении полётов. Основное внимание уделено прогнозированию ветра, давления и температуры воздуха. Сделан акцент на использование прогностической информации для повышения экономической эффективности и безопасности полетов.

В работе использованы фактические и прогностические (заблаговременность прогноза 3 суток) данные за январь 2024 года и июль 2023 года.

Анализ результатов прогнозов позволяет сделать вывод о том, что использование данных гидродинамического моделирования позволит повысить эффективность и безопасность полётов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Позднякова В.А. Практическая авиационная метеорология. – Екатеринбург, 2010. – 113 с.2.
2. Palmén, E. H. (1969). Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation. (C. W. Newton, Ed.).
3. Богаткин О.Г. Авиационная Метеорологияия. Учебник. - СПб.: Изд. РГГМУ' 2005. - 328 с.
4. Анискина О.Г. Некоторые аспекты математического моделирования атмосферных процессов. Учебное пособие – СПб.:, 2016. – 168 с.
5. Русин И.Н. Основы учения об атмосфере: учебное пособие. – Санкт-Петербург: СпецЛит, 2018. – 271 с.
6. Nebeker, Frederik. Calculating the weather : meteorology in the 20th century. ACADEMIC PRESS, INC. – 1995.
7. Хромов С. П. Метеорология и климатология. Ленинград Гидрометеиздат, 1983.
8. Center for multiscale modeling of atmospheric processes. CMMAР. [электронный ресурс] <https://hogback.atmos.colostate.edu/cmmap/learn/modeling/whatIs2.html>
9. SKYbrary Aviation Safety. URL: <https://skybrary.aero/articles/jet-stream>
10. Проект "УГолок синоптика". [электронный ресурс] <http://meteomaps.ru/#!/sevzapfed/0>
11. U.S. Department of transportation. Federal Aviation Administration. PILOT WINDSHEAR GUIDE 11/25/88
12. National meteorological service for the UK. [электронный ресурс] <https://www.metoffice.gov.uk/>

13. Climavision. THE ULTIMATE GUIDE TO WEATHER FORECAST MODELS 2024. [электронный ресурс] <https://climavision.com/resources/the-ultimate-guide-to-weather-forecast-models>
14. Синоптическая метеорология. Компьютерные модели. Долгосрочные прогнозы. Климат. Экология. Для любителей и профессионалов [электронный ресурс]. [электронный ресурс] <https://vk.com/meteoforecast> (дата доступа 14 июня 2024 г.)
15. Сайт Гидрометцентра России <https://meteoinfo.ru/plav-forc-rus1> [электронный ресурс] (дата доступа 21 июня 2024)
16. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды - Л: Гидрометеиздат, 1989. - 376 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – Метеорологические величины доступные для анализа в файлах прогноза модели GFS

gfs.0p25,2024010100.f000.grib2	gfs.0p25,2024010100.f000.grib2
Absolute_vorticity_isobaric	Absolute vorticity @ Isobaric surface
Apparent_temperature_height_above_ground	Apparent temperature @ Specified height level above ground
Best_4_layer_Lifted_Index_surface	Best (4 layer) Lifted Index @ Ground or water surface
Categorical_Freezing_Rain_surface	Categorical Freezing Rain @ Ground or water surface
Categorical_Ice_Pellets_surface	Categorical Ice Pellets @ Ground or water surface
Categorical_Rain_surface	Categorical Rain @ Ground or water surface
Categorical_Snow_surface	Categorical Snow @ Ground or water surface
Cloud_mixing_ratio_hybrid	Cloud mixing ratio @ Hybrid level
Cloud_mixing_ratio_isobaric	Cloud mixing ratio @ Isobaric surface
Cloud_water_entire_atmosphere_single_layer	Cloud water @ Entire atmosphere layer
Composite_reflectivity_entire_atmosphere	Composite reflectivity @ Entire atmosphere
Convective_available_potential_energy_pressu...	Convective available potential energy @ Level at specified p...
Convective_available_potential_energy_surface	Convective available potential energy @ Ground or water su...
Convective_inhibition_pressure_difference_layer	Convective inhibition @ Level at specified pressure differenc...
Convective_inhibition_surface	Convective inhibition @ Ground or water surface
Dewpoint_temperature_height_above_ground	Dewpoint temperature @ Specified height level above ground
Field_Capacity_surface	Field Capacity @ Ground or water surface
Frictional_Velocity_surface	Frictional Velocity @ Ground or water surface
Geopotential_height_cloud_ceiling	Geopotential height @ Cloud ceiling
Geopotential_height_highest_tropospheric_fre...	Geopotential height @ Highest tropospheric freezing level
Geopotential_height_isobaric	Geopotential height @ Isobaric surface
Geopotential_height_maximum_wind	Geopotential height @ Maximum wind level
Geopotential_height_potential_vorticity_surface	Geopotential height @ Potential vorticity surface
Geopotential_height_surface	Geopotential height @ Ground or water surface
Geopotential_height_tropopause	Geopotential height @ Tropopause
Geopotential_height_zeroDegC_isotherm	Geopotential height @ Level of 0 °C isotherm
Graupel_snow_pellets_hybrid	Graupel (snow pellets) @ Hybrid level
Graupel_snow_pellets_isobaric	Graupel (snow pellets) @ Isobaric surface
Haines_index_surface	Haines index @ Ground or water surface
High_cloud_cover_high_cloud	High cloud cover @ High cloud layer
ICAO_Standard_Atmosphere_Reference_Heigh...	ICAO Standard Atmosphere Reference Height @ Maximum ...
ICAO_Standard_Atmosphere_Reference_Heigh...	ICAO Standard Atmosphere Reference Height @ Tropopause
Ice_cover_surface	Ice cover @ Ground or water surface
Ice_growth_rate_altitude_above_msl	Ice growth rate @ Specific altitude above mean sea level
Ice_temperature_surface	Ice temperature @ Ground or water surface
Ice_thickness_surface	Ice thickness @ Ground or water surface
Ice_water_mixing_ratio_hybrid	Ice water mixing ratio @ Hybrid level
Ice_water_mixing_ratio_isobaric	Ice water mixing ratio @ Isobaric surface
Land_cover_0_sea_1_land_surface	Land cover (0 = sea, 1 = land) @ Ground or water surface
Liquid_Volumetric_Soil_Moisture_non_Frozen_d...	Liquid Volumetric Soil Moisture (non Frozen) @ Depth below l...
Low_cloud_cover_low_cloud	Low cloud cover @ Low cloud layer

 Medium_cloud_cover_middle_cloud	Medium cloud cover @ Middle cloud layer
 MSLP_Eta_model_reduction_msl	MSLP (Eta model reduction) @ Mean sea level
 Ozone_Mixing_Ratio_isobaric	Ozone Mixing Ratio @ Isobaric surface
 Per_cent_frozen_precipitation_surface	Per cent frozen precipitation @ Ground or water surface
 Planetary_Boundary_Layer_Height_surface	Planetary Boundary Layer Height @ Ground or water surface
 Plant_Canopy_Surface_Water_surface	Plant Canopy Surface Water @ Ground or water surface
 Potential_temperature_sigma	Potential temperature @ Sigma level
 Precipitable_water_entire_atmosphere_single_l...	Precipitable water @ Entire atmosphere layer
 Precipitation_rate_surface	Precipitation rate @ Ground or water surface
 Pressure_height_above_ground	Pressure @ Specified height level above ground
 Pressure_maximum_wind	Pressure @ Maximum wind level
 Pressure_of_level_from_which_parcel_was_lift...	Pressure of level from which parcel was lifted @ Level at spe...
 Pressure_potential_vorticity_surface	Pressure @ Potential vorticity surface
 Pressure_reduced_to_MSL_msl	Pressure reduced to MSL @ Mean sea level
 Pressure_surface	Pressure @ Ground or water surface
 Pressure_tropopause	Pressure @ Tropopause
 Rain_mixing_ratio_hybrid	Rain mixing ratio @ Hybrid level
 Rain_mixing_ratio_isobaric	Rain mixing ratio @ Isobaric surface
 Reflectivity_height_above_ground	Reflectivity @ Specified height level above ground
 Reflectivity_hybrid	Reflectivity @ Hybrid level
 Relative_humidity_entire_atmosphere_single_la...	Relative humidity @ Entire atmosphere layer
 Relative_humidity_height_above_ground	Relative humidity @ Specified height level above ground
 Relative_humidity_highest_tropospheric_freezing	Relative humidity @ Highest tropospheric freezing level
 Relative_humidity_isobaric	Relative humidity @ Isobaric surface
 Relative_humidity_pressure_difference_layer	Relative humidity @ Level at specified pressure difference fr...
 Relative_humidity_sigma	Relative humidity @ Sigma level
 Relative_humidity_sigma_layer	Relative humidity @ Sigma level layer
 Relative_humidity_zeroDegC_isotherm	Relative humidity @ Level of 0 °C isotherm
 Snow_depth_surface	Snow depth @ Ground or water surface
 Snow_mixing_ratio_hybrid	Snow mixing ratio @ Hybrid level
 Snow_mixing_ratio_isobaric	Snow mixing ratio @ Isobaric surface
 Soil_temperature_depth_below_surface_layer	Soil temperature @ Depth below land surface layer
 Soil_type_surface	Soil type @ Ground or water surface
 Specific_humidity_height_above_ground	Specific humidity @ Specified height level above ground
 Specific_humidity_isobaric	Specific humidity @ Isobaric surface
 Specific_humidity_pressure_difference_layer	Specific humidity @ Level at specified pressure difference fr...
 Storm_relative_helicity_height_above_ground_l...	Storm relative helicity @ Specified height level above ground...
 Sunshine_Duration_surface	Sunshine Duration @ Ground or water surface
 Surface_Lifted_Index_surface	Surface Lifted Index @ Ground or water surface
 Surface_roughness_surface	Surface roughness @ Ground or water surface
 Temperature_altitude_above_msl	Temperature @ Specific altitude above mean sea level
 Temperature_height_above_ground	Temperature @ Specified height level above ground

 Temperature_isobaric	Temperature @ Isobaric surface
 Temperature_maximum_wind	Temperature @ Maximum wind level
 Temperature_potential_vorticity_surface	Temperature @ Potential vorticity surface
 Temperature_pressure_difference_layer	Temperature @ Level at specified pressure difference from ...
 Temperature_sigma	Temperature @ Sigma level
 Temperature_surface	Temperature @ Ground or water surface
 Temperature_tropopause	Temperature @ Tropopause
 Total_cloud_cover_entire_atmosphere	Total cloud cover @ Entire atmosphere
 Total_cloud_cover_isobaric	Total cloud cover @ Isobaric surface
 Total_ozone_entire_atmosphere_single_layer	Total ozone @ Entire atmosphere layer
 u-component_of_wind_altitude_above_msl	u-component of wind @ Specific altitude above mean sea level
 u-component_of_wind_height_above_ground	u-component of wind @ Specified height level above ground
 u-component_of_wind_isobaric	u-component of wind @ Isobaric surface
 u-component_of_wind_maximum_wind	u-component of wind @ Maximum wind level
 u-component_of_wind_planetary_boundary	u-component of wind @ Planetary Boundary Layer
 u-component_of_wind_potential_vorticity_surf...	u-component of wind @ Potential vorticity surface
 u-component_of_wind_pressure_difference_layer	u-component of wind @ Level at specified pressure differen...
 u-component_of_wind_sigma	u-component of wind @ Sigma level
 u-component_of_wind_tropopause	u-component of wind @ Tropopause
 U-Component_Storm_Motion_height_above_gr...	U-Component Storm Motion @ Specified height level above ...
 v-component_of_wind_altitude_above_msl	v-component of wind @ Specific altitude above mean sea level
 v-component_of_wind_height_above_ground	v-component of wind @ Specified height level above ground
 v-component_of_wind_isobaric	v-component of wind @ Isobaric surface
 v-component_of_wind_maximum_wind	v-component of wind @ Maximum wind level
 v-component_of_wind_planetary_boundary	v-component of wind @ Planetary Boundary Layer
 v-component_of_wind_potential_vorticity_surf...	v-component of wind @ Potential vorticity surface
 v-component_of_wind_pressure_difference_layer	v-component of wind @ Level at specified pressure differen...
 v-component_of_wind_sigma	v-component of wind @ Sigma level
 v-component_of_wind_tropopause	v-component of wind @ Tropopause
 V-Component_Storm_Motion_height_above_gr...	V-Component Storm Motion @ Specified height level above g...
 Vegetation_surface	Vegetation @ Ground or water surface
 Ventilation_Rate_planetary_boundary	Ventilation Rate @ Planetary Boundary Layer
 Vertical_Speed_Shear_potential_vorticity_surface	Vertical Speed Shear @ Potential vorticity surface
 Vertical_Speed_Shear_tropopause	Vertical Speed Shear @ Tropopause
 Vertical_velocity_geometric_isobaric	Vertical velocity (geometric) @ Isobaric surface
 Vertical_velocity_pressure_isobaric	Vertical velocity (pressure) @ Isobaric surface
 Vertical_velocity_pressure_sigma	Vertical velocity (pressure) @ Sigma level
 Visibility_surface	Visibility @ Ground or water surface
 Volumetric_Soil_Moisture_Content_depth_belo...	Volumetric Soil Moisture Content @ Depth below land surfac...
 Water_equivalent_of_accumulated_snow_dept...	Water equivalent of accumulated snow depth @ Ground or ...
 Wilting_Point_surface	Wilting Point @ Ground or water surface
 Wind_speed_gust_surface	Wind speed (gust) @ Ground or water surface