



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: «Анализ успешности прогнозов максимальной температуры воздуха
по оперативным моделям погоды на северо-западе европейской
территории России»

Исполнитель _____ Никулина Алина Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____ кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Ефимова Юлия Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«06» июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. Общая характеристика многолетнего режима погоды на северо-западе Европейской территории России	6
1.1 Физико-географическое положение северо-запада Европейской территории России	6
1.2 Климат Северо-Запада Европейской территории России.....	8
1.3 Особенности атмосферной циркуляции на северо-западе Европейской территории России	11
Глава 2. Математические модели в прогнозе погоды.....	14
2.1 Поле температуры.....	14
2.2 История развития, численных прогнозов погоды	16
2.3 Принципы построения прогностических моделей атмосферы	18
2.4 Модель ICON.....	20
2.5 Модель ПЛАВ	22
Глава 3. Анализ успешности прогнозов температуры воздуха	25
3.1 Порядок составления краткосрочных прогнозов погоды.....	25
3.2 Оценка успешности прогноза температуры воздуха	26
3.3 Сравнительный анализ количества ошибочных прогнозов температуры воздуха по прогностическим моделям ICON и ПЛАВ	28
3.4 Расчёт критериев успешности прогноза температуры воздуха для Северо-Запада Европейской территории России.	34
3.5 Анализ синоптических ситуаций, сопутствующих неуспешным прогнозам максимальной температуры воздуха.	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	55
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	57
Приложение А	59

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование погодных условий является одной из ключевых задач современной метеорологии, имеющей важное значение для различных сфер деятельности, включая сельское хозяйство, энергетику, транспорт, строительство. Особое внимание уделяется прогнозу температуры воздуха, так как этот параметр напрямую влияет на комфортность проживания населения, состояние экосистем и обслуживание различных отраслей народного хозяйства. В условиях глобального изменения климата, сопровождающегося увеличением частоты экстремальных погодных явлений, повышение точности прогнозирования температуры воздуха становится все более актуальной задачей. Согласно докладу Росгидромета за 2024 год, скорость роста осредненной по России среднегодовой температуры составила $+0,50^{\circ}\text{C}/10$ лет, а среднегодовые температуры были выше на $1,21^{\circ}\text{C}$ по территории России и на $1,36^{\circ}\text{C}$ по Европейской части России [1].

Северо-запад Европейской территории России представляет собой регион с уникальными климатическими условиями, обусловленными влиянием Атлантического океана, Финского залива и морей Северного Ледовитого океана. Этот регион характеризуется высокой изменчивостью погодных условий, что делает задачу прогнозирования температуры воздуха особенно сложной. В связи с этим анализ успешности прогнозов температуры воздуха, полученных с использованием численных моделей, приобретает особую актуальность для данного региона.

Численные модели прогнозирования погоды, основанные на решении основной системы уравнений гидродинамики атмосферы, являются одними из основных инструментов получения прогностической информации. Современные модели позволяют учитывать множество факторов, влияющих на формирование температуры воздуха, включая радиационный баланс, адвекцию тепла, турбулентный обмен и взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью. Однако, несмотря на значительный прогресс в развитии численных методов и вычислительных мощностей, прогнозы температуры

воздуха остаются подвержены ошибкам, связанным с неопределенностью начальных условий, упрощением физических процессов и ограниченным пространственным разрешением моделей.

Анализ успешности прогнозов температуры воздуха по численным моделям является неотъемлемой частью процесса совершенствования метеорологического обеспечения. Такой анализ позволяет оценить точность работы конкретных моделей, выявить их сильные и слабые стороны, а также определить направления для дальнейшего развития. Результаты подобных исследований имеют большое значение для улучшения качества метеорологического обслуживания, разработки новых методик прогнозирования и повышения эффективности использования метеорологической информации в различных отраслях экономики.

Также можно отметить, что синоптическая ситуация оказывает существенное влияние на качество прогноза. Отсюда следует необходимость установить зависимость между успешностью прогноза и синоптической ситуацией, которая наблюдается над исследуемой территорией. Особенно эта касается такой важной характеристики как температура воздуха.

Целью бакалаврской работы является определение наиболее успешной модели для данной территории.

Для достижения поставленной цели требуется:

1. создать архив прогностических данных максимальной температуры воздуха заблаговременностью 24 ч для каждой модели и выбранных городов;
2. рассчитать и проанализировать критерии успешности прогнозов. В процессе исследования использовались такие критерии анализа успешности прогноза как: средняя абсолютная ошибка, средняя систематическая ошибка;
3. проанализировать синоптическую ситуацию в дни с ошибочными прогнозами температуры воздуха.

Для проведения сравнительного анализа использовались прогностические данные максимальной температуры воздуха, полученные по прогностическим

моделям погоды ICON и ПЛАВ, и архив метеорологических наблюдений по пунктам: Великий Новгород, Вологда, Петрозаводск, Псков, Санкт-Петербург.

Таким образом, данная работа направлена на решение важной научно-практической задачи, связанной с повышением точности прогнозов максимальной температуры воздуха на северо-западе Европейской территории России. Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования методов прогнозирования погоды и повышения эффективности использования прогностической информации в различных сферах деятельности.

Научная новизна исследования заключается в комплексном анализе успешности прогнозов максимальной температуры воздуха на северо-западе Европейской территории России с учетом региональных климатических особенностей. В работе проводится сравнительная оценка точности прогнозов, полученных с использованием различных численных моделей, что позволяет выявить их сильные и слабые стороны.

Глава 1. Общая характеристика многолетнего режима погоды на северо-западе Европейской территории России

1.1 Физико-географическое положение северо-запада Европейской территории России

Район располагается примерно между $69,0^{\circ}$ с. ш. и $61^{\circ},5'$ с. ш.; $28,3^{\circ}$ в. д. и $64,1^{\circ}$ в. д. Имеет протяженность с севера на юг около 600 км, а с запада на восток около 500 км. Также в состав Европейского Северо-Запада входит обособленная от основной территории Калининградская область.

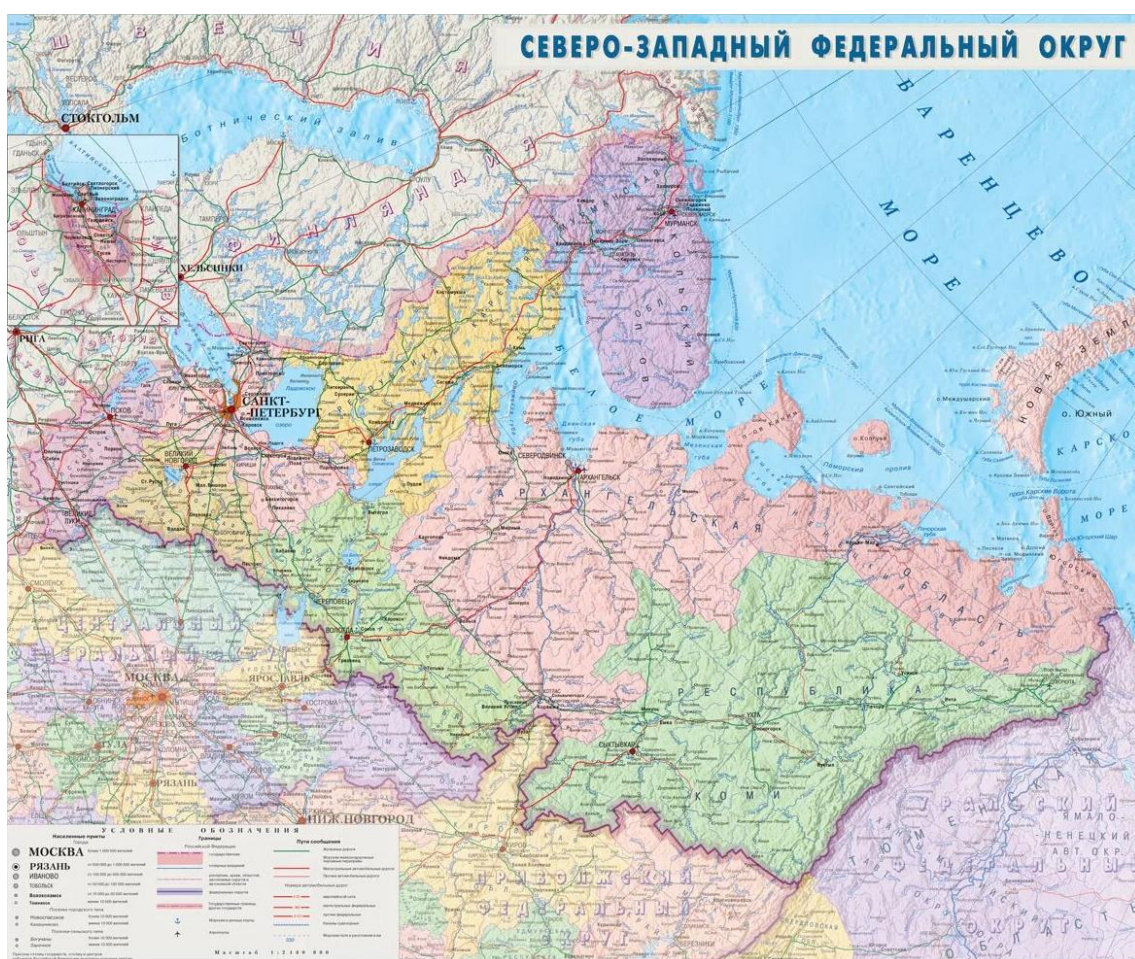


Рисунок 1.1 - Карта северо-запада Европейской территории России.

Большая часть территории северо-запада Европейской территории России расположена в пределах Восточно-Европейской равнины. Рельеф выражен Прибалтийской низменностью, а на юго-востоке Валдайской возвышенностью [2].

В значительной степени современный рельеф района сформирован ледниками. В данном районе наблюдалось чередование ледниковых эпох и межледниковья. На территории расположено большое количество ледниковых гряд и холмов, которые сменяются заболоченными районами и большим количеством озер. Озера образовывались в ложбинах и впадинах вследствие таяния ледников.

Балтийский щит, который представляет участок выхода на поверхность кристаллических пород фундамента древней восточно-европейской платформы, занимает преобладающую площадь Кольско-Карельской части. Двинско-Печорская часть является участком Русской плиты, на котором фундамент перекрыт осадочными отложениями. Формы рельефа, в Двинско-Печорской части, более размытые, междуречья представляют собой плоскую или волнистую поверхность. Низины чередуются с холмами и грядами. Низины, которые заняты долинами рек, постепенно переходят в приморские низменности, на поверхности которых располагаются морские отложения. На обеих частях преобладает равнинный рельеф, высоты которого в общем случае не превышают 500 метров, за исключением горного массива Хибины и горы Народная, их высоты достигают 1200 м и 1895 м соответственно. Вдоль берегов Финского залива располагается прибрежная низменность, которая ограничена высоким уступом с юга. Такой уступ связан с древним Балтийским морем, который во времена обледенения имел более высокий уровень воды. Также помимо моренных холмов, на территории располагаются длинные и узкие песчаные озы высотой около 15 м, камы и зандры.

На северо-западе Европейской территории России наблюдается избыточное увлажнение, что приводит к образованию большого количества озер и болот, которые в свою очередь являются источниками для многочисленных рек. Заболоченность территории достигает около 30 % [2].

Большая протяженность береговых линий является отличительной чертой данного района, который омывается водами Баренцева, Белого и Карского моря, а также Финским заливом. Кроме того, на северо-западе ЕТР располагается

большое количество озер, например таких как: Ладожское, Онежское, Чудское и Псковское, а также озеро Ильмень. Кроме того, для территории характерна густая сеть рек. Здесь протекают такие реки как Нева, Волхов и Свирь. Они имеют небольшие размеры, но достаточно полноводны [2].

1.2 Климат Северо-Запада Европейской территории России

Северо-запад Европейской территории России располагается в двух климатических поясах, таких как: субарктический и умеренно-континентальный. Рассмотрим характерные особенности данных климатических поясов.



Рисунок 1.2 - Карта климатических поясов России.

Субарктический пояс является переходным от арктического к умеренному поясу. Это указывает на то, что в течение года здесь происходит смена воздушных масс арктических и умеренных широт. В пределах Восточно-Европейской долины и Западной Сибири располагается за полярным кругом, а на северо-востоке распространяется до 60° [3].

Зимой преобладают арктические воздушные массы, поэтому зимы холодные и продолжительные, с небольшим количеством осадков. Температура января снижается при движении на восток. В европейской части -5°C , что связано с влиянием Атлантики, до -20°C в сибирской части и от -40°C до -50°C в Якутии. Часть субарктического пояса, прилегающая к Тихому океану, подвержена влиянию циклонов, поэтому температура января повышается до -20°C .

Летом приходит более тёплый воздух умеренных широт, и суммарная солнечная радиация возрастает до $70\text{--}80$ ккал/см². Лето довольно прохладное, но на большей территории теплее, чем в арктическом поясе. Средняя температура июля колеблется от $+4^{\circ}\text{C}$ до $+11^{\circ}\text{C}$. Характерной особенностью данного пояса является то, что в любой из теплых месяцев возможно появление заморозков.

Общее количество осадков увеличивается с востока (200 мм) на запад (600 мм), они выпадают часто, но имеют невысокую интенсивность. Низкие температуры приводят к очень небольшому испарению, поэтому территории характеризуются избыточным увлажнением и заболоченностью. Долгие зимы способствуют образованию вечной мерзлоты.

Климат Атлантической и Тихоокеанской областей формируется главным образом под влиянием циклонической деятельности на арктических фронтах, в следствие этого повышаются температуры зимой. Летом, циклоническая деятельность способствует образованию облачности и в следствии этого снижению суммарной радиации [3].

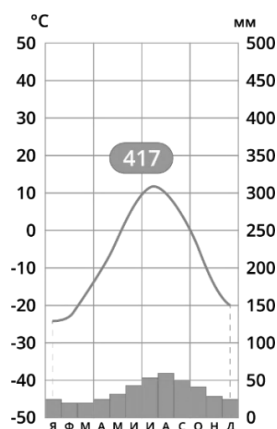


Рисунок 1.3 - Климатограмма субарктического климатического пояса.

Умеренный пояс занимает самую большую площадь в пределах страны. Характерен для Европейской части России и крайнего северо-запада умеренного пояса в пределах Западной Сибири. Величины суммарной солнечной радиации изменяется от 70 ккал/см² на севере до 120–130 ккал/см² на юге. В зимний период поступает низкое количество солнечной радиации, причем ее значительная часть отражается от снежного покрова. Наблюдается сильное выхолаживание поверхности земли и приземного слоя воздуха, вследствие этого формируется холодный континентальный воздух умеренных широт. Летом приток солнечной радиации увеличивается, а за счет сокращения альбедо уменьшается и отражение. Таким образом в умеренном поясе зима холодная, а лето теплое. В течении всего года господствуют воздушные массы умеренных широт, а на северных и южных границах формируются атмосферные фронты с арктическими и тропическими воздушными массами соответственно. В этом типе климата характерны изменения климатических условий при движении с севера на юг — увеличение температуры и сухости воздуха и с запада на восток — снижение годового количества осадков и трансформация воздушных масс в местные, континентальные. В пределах умеренного пояса выделяются пять типов климата, сменяющих друг друга с запада на восток [3].

Рассмотрим умеренно-континентальный климат, который характерен для территории северо-запада ЕТР.

Сказывается влияние Атлантического океана, который приносит влажные морские воздушные массы, относительно тёплые зимой и прохладные летом. Лето на данной территории относительно тёплое. Средние температуры июля уменьшаются с юга на север и составляют +24°C и +15°C соответственно. Зима достаточно мягкая. Средние температуры января понижаются при движении с запада на восток, от -4°C до -20°C.

Доля осадков зимой достаточно большая, но из-за частых оттепелей мощность снежного покрова менее 60 см на преобладающей части территории. Годовое количество осадков увеличивается с юга-востока на северо-запад. Из-за

такого распределения осадков на севере области наблюдается избыточное увлажнение, а в южной части наоборот недостаточное [3].

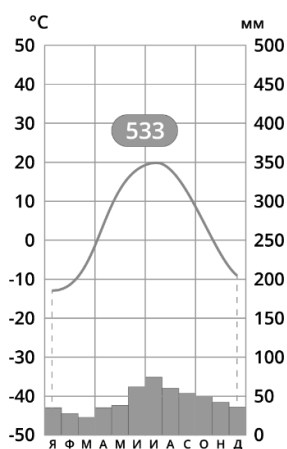


Рисунок 1.4 - Климатограмма умеренно-континентального климатического пояса.

1.3 Особенности атмосферной циркуляции на северо-западе Европейской территории России

Общая циркуляция атмосферы (ОЦА) — это совокупность основных атмосферных течений. Она является одной из основных характеристик состояния климатической системы, а также оказывает большое влияние на формирование климатического режима в отдельных регионах [4].

Основная причина, создающая атмосферную циркуляцию — это неравномерный радиационный баланс на различных широтах Земли. Также на атмосферную циркуляцию влияет и ряд других факторов: температурные различия между материками и океанами, влияние трения и вращения Земли, волнообразование и вихреобразование.

Общая циркуляция атмосферы включает в себя ряд крупномасштабных движений:

- Западный перенос масс воздуха в тропосфере и стратосфере;
- Циркуляцию воздуха в системе внетропических циклонов и антициклонов, которая оказывает существенное влияние на межширотный воздухообмен;

- Муссонную циркуляцию, которая связана с системной циклонов и антициклонов [4].

Термический режим является одним из ключевых факторов, определяющих климатические условия и погодные особенности в регионе. В последние десятилетия наблюдаются значительные изменения климата, приводящие к более частым и интенсивным метеорологическим явлениям.

Возникновение, перемещение и эволюция крупномасштабных синоптических вихрей, таких как циклоны и антициклоны, является основной чертой циркуляционных процессов на северо-западе Европейской территории России.

В системе атмосферной циркуляции на северо-запад ЕТР воздействуют воздушные массы, сформировавшиеся над различными территориями и имеющими различные метеорологические характеристики.

Европейская территория России находится под постоянным воздействием атмосферных процессов, возникающих в Северной Атлантике вследствие преобладающей зональной циркуляции. Значительное число циклонов смещаются через Балтийское море и Финский залив, что вызывает резкое различие погодных условий над ЕТР севернее и южнее 60-й параллели. Такие циклоны могут привести к наводнениям на территории Санкт-Петербурга.

Средиземноморские, черноморские, а летом и Каспийские циклоны часто выходят на территорию ЕТР и иногда распространяются севернее 55-й параллели, где становятся малоподвижными и вызывают длительное выпадение осадков. Зимой они приводят к метелям и гололеду, а летом к грозам.

Иногда на территорию ЕТР почти меридионально перемещаются циклоны со стороны Кольского полуострова.

Над ЕТР антициклоны перемещаются с северо-востока по западной и восточной траекториям, а также с севера на юг с небольшой западной составляющей. Две из этих траекторий лежат на крайнем юге европейской части и в северо-западной части побережья Баренцева моря, а основная центральная траектория делит европейскую часть страны и вытянута с северо-запада (район

Кольского полуострова) на юго-восток. На юго-востоке европейской части антициклоны в зимнее время обычно стационарируют.

Воздействие атлантических и континентальных воздушных масс, арктические вторжения и интенсивная циклоническая деятельность являются главными климатообразующими факторами [5].

Глава 2. Математические модели в прогнозе погоды.

Современные методы прогнозирования погоды основываются на сложных математических моделях, которые описывают атмосферные процессы с помощью систем уравнений гидродинамики и термодинамики. Эти модели позволяют рассчитывать будущее состояние атмосферы на основе начальных данных, полученных с помощью метеорологических, радиолокационных и спутниковых наблюдений. Точность прогноза во многом зависит от вычислительных алгоритмов, параметризации физических процессов и способов обработки входных данных.

В данной работе рассматривались результаты прогнозов двух прогностических моделей — ICON [6] и ПЛАВ [7].

2.1 Поле температуры

Температура воздуха по горизонтали часто меняется скачкообразно. Такие изменения обычно наблюдаются при прохождении атмосферного фронта. Неоднородность подстилающей поверхности существенно влияет на пространственную изменчивость температуры.

В свободной атмосфере поле температуры более сглаженное, чем у земной поверхности. На картах абсолютной топографии АТр, которые представляют собой проекцию данной изобарической поверхности на плоскость, можно выделить очаги тепла и холода, при этом также могут проявляться зоны скачкообразного изменения температуры воздуха [8].

Изменение температуры в данной точке, т.е. ее локальное изменение, описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \omega \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{dT}{dz}, \quad (2.1)$$

Первое слагаемое представляет собой адвективное изменение температуры, обусловленное горизонтальным переносом воздушной массы в

предположении, что на пути переноса температура воздушной частицы не изменится. Положительное изменение температуры обусловлено адвекцией тепла (перенос воздуха происходит из области тепла в область холода), а отрицательная - адвекцией холода (из области холода в область тепла). В среднем адвективное изменение температуры составляет несколько градусов за 12 часов, но при прохождении фронтов оно может составлять 10°C и более за более короткий промежуток времени.

Второе слагаемое учитывает изменение температуры, обусловленное вертикальным движением воздуха. При устойчивой стратификации восходящие движения приводят к понижению температуры на фиксированном уровне, а при неустойчивой - к повышению. При нисходящих движениях изменение температуры обратное. Если существуют условия для сохранения знака вертикальной скорости в течении продолжительного времени, например на атмосферных фронтах, вертикальные движения воздуха могут привести к существенной перестройке поля температуры.

Третье слагаемое описывает вклад индивидуального изменения температуры, т. е. изменение температуры самой частицы. Такое изменение обычно обусловлено притоком тепла, но может иметь и другое происхождение. Значительный теплообмен между приземным слоем воздуха и подстилающей поверхностью наблюдается у земной поверхности. Вертикальная скорость у земной поверхности может быть принята равной нулю.

Таким образом локальное изменение температуры определяется адвекцией и притоком тепла. Особенно значителен вклад адвективного фактора при прохождении фронтов.

Изменения температуры, связанные с фазовыми превращениями воды в атмосфере [8].

Такие изменения имеют место в пределах почти всей тропосферы. При конденсации и замерзании выделяется удельная теплота, а при испарении и таянии тепло расходуется. Таким образом при облакообразовании должно

выделяться большое суммарное количество тепла. Но в результаты исследований не было выявлено заметного повышения температуры.

Горизонтальный перенос воздушных масс является основной причиной изменения температуры воздуха. Вертикальные движения воздуха при благоприятных условиях вносят определенный вклад в свободной атмосфере, а турбулентный обмен у земной поверхности [8].

2.2 История развития, численных прогнозов погоды

Использование математики в метеорологии имеет долгую историю, но именно XX век ознаменовался революцией в применении математических моделей для численного прогнозирования погоды. Впервые попытки использовать математику для описания атмосферных процессов были предприняты в начале XX века.

В 1860 году Уильям Феррель опубликовал ряд статей, в которых были описаны математические методы применяемые для анализа движения жидкостей на Земле. Его исследования заложили фундамент для последующего развития физико-математической теории атмосферных процессов, которая сегодня является основой динамической метеорологии.

В 1904 году норвежский метеоролог Вильгельм Бьеркнес выразил идею о том, что изменение состояния атмосферы во времени подчиняется основным физическим законам и предложил использовать уравнения гидродинамики для описания атмосферных движений [9].

Льюис Фрай Ричардсон, британский математик и метеоролог, в 1922-ом году предпринял первую попытку численного прогноза погоды, используя гидростатическую вариацию примитивных уравнений Бьеркнеса. Он вручную выполнил расчёты для двух городов Центральной Европы, что заняло у него не менее 6 недель и не привело к успешному результату. В 1950 году под руководством Джула Чарни был впервые выполнен численный прогноз погоды с использованием компьютера ENIAC. Эта работа считается отправной точкой в развитии современного численного прогнозирования погоды. В последующие

десятилетия численные модели становились все более сложными и точными. Ученые разработали новые алгоритмы и методы решения уравнений, что позволило учитывать все больше факторов, влияющих на погоду. Развитие спутниковой метеорологии также способствует более точному описанию состояния атмосферы. Сегодня численные модели являются основой всех современных систем прогнозирования погоды. Они используют самые мощные компьютеры для обработки огромных массивов данных и решения сложных уравнений, что позволяет прогнозировать погоду с высокой точностью.

Развитие технологий атмосферного моделирования приводит к постоянному расширению спектра воспроизводимых явлений и возможностей применения компьютерных моделей атмосферы. С момента появления компьютерного моделирования атмосферы в 1948 году, модели использовались для изучения погодных явлений, климата и проблем, связанных с загрязнением атмосферы и окружающей среды. Изначально метеорологические модели применялись для прогнозирования погоды и изменения климата, а специализированные модели использовались для исследования химии и фотохимии атмосферы. Только сейчас были созданы универсальные программные системы, объединяющие динамическую метеорологию и химию атмосферы, что позволяет моделировать широкий спектр атмосферных явлений.

Компьютерная модель атмосферы в общем виде представляет собой программное описание динамических, физических, химических и радиационных процессов в атмосфере. Кроме дифференциальных уравнений, это описание включает также параметрические и эмпирические уравнения. Для многих процессов размер шага сетки, используемый в конкретных расчётах, не позволяет адекватно воспроизводить их в процессе моделирования. В таких случаях для их полного представления применяются так называемые «параметризации» [9].

Цель создания компьютерной модели атмосферы заключается в двух аспектах:

- Изучение процессов физического, химического, динамического и радиационного характера с использованием моделирования;
- Повышение качества моделирования для практического применения этой компьютерной модели в прогнозировании погодных условий, изменений климата и в других областях [9].

2.3 Принципы построение прогностических моделей атмосферы

Гидродинамические модели атмосферы являются основой численных методов прогноза погоды. Создание таких моделей состоит из нескольких этапов:

- определение и описание физических процессов, которые влияют на изменения погоды;
- выбор дифференциальных или других уравнений для описания этих процессов и, при необходимости, преобразование уравнений из одной системы координат в другую, связанную с картографическими проекциями Земли;
- замена сложной и непрерывной атмосферной среды на более простую с ограниченным количеством параметров и значениями метеорологических величин в определённых точках пространства;
- численное решение уравнений и расчёт значений метеорологических величин для заданных точек пространства и времени.

При создании прогностических моделей атмосферы для краткосрочных (1-3 дня) и среднесрочных (3-10 дней) прогнозов погоды выделяются три основных типа атмосферных процессов: крупномасштабные, среднемасштабные и мелкомасштабные [10].

Крупномасштабные или макромасштабные процессы. Им свойственны горизонтальные масштабы порядка тысяч километров (от 1 до 10) и развиваются они в течении нескольких суток (1-10). Циклогенез и струйные течения являются примерами таких процессов.

Мезомасштабные процессы происходят на территориях с линейными размерами порядка десятков и сотен километров за временной интервал порядка

часов. Среди мезопроцессов можно выделить атмосферные фронты, образование кучевых облаков, орографические возмущения и др.

Микромасштабные процессы характеризуются горизонтальными масштабами порядка сантиметров и метров, а также временными масштабами порядка секунд и минут. Примеры таких процессов включают атмосферную турбулентность и явления в приземном слое.

Атмосферные движения имеют волнообразный характер, что важно учитывать при создании и реализации прогностических моделей. Рассмотрим ключевые аспекты о типах волновых колебаний, имеющих значение для прогностических моделей.

Крупномасштабные волны, также известные как инерционные волны или волны Россби, являются синоптически значимыми волнами. Их длина достигает нескольких тысяч километров, а период составляет несколько дней. Колебания в полях давления и ветра имеют амплитуду порядка десятков гектопаскалей и десятков метров в секунду соответственно. Эти волны являются частью крупномасштабных процессов и должны быть учтены при разработке прогностических моделей.

Гравитационные волны возникают при нарушении гидростатического равновесия и относятся в основном к мезомасштабным процессам, но некоторые из них так же могут быть характерны и для мелкомасштабных процессов. Их амплитуда в поле ветра составляет несколько метров в секунду. Эти волны играют важную роль в возникновении агеострофических составляющих скорости ветра и циклогенеза, поэтому их учёт в прогностических моделях также необходим [10].

Акустические волны, хотя и относятся к микромасштабному диапазону и не оказывают влияния на формирование погоды. Однако они могут существенно влиять на результаты численного интегрирования уравнений модели.

Формирование погодных условий зависит от всех типов атмосферных процессов (исключая акустические колебания). Однако вклад каждого процесса может отличаться в разных ситуациях. Таким образом, создание «общей

картины» погоды на обширных территориях («основного фона») определяется преимущественно крупномасштабными процессами и крупномасштабными волнами. В то же время микропроцессы вносят свой вклад, хоть и меньший по значимости.

Погода в определённой местности и в конкретное время суток будет зависеть в основном от мезомасштабных процессов, развивающихся на фоне крупномасштабных. Образование кучево-дождевых облаков и ливней в тылу циклонов служат характерным примером этого.

Исходя из этих соображений, следует определить приоритеты для включения различных процессов в прогностическую модель: крупномасштабных, мезомасштабных и микромасштабных. Таким образом, на начальном этапе создания прогностических моделей необходимо сформулировать уравнения гидротермодинамики, которые будут описывать крупномасштабные атмосферные процессы.

Все прогностические модели атмосферы основаны на уравнениях движения, теплового баланса, неразрывности, переноса влаги и атмосферных веществ, которые выражают законы физики (сохранения импульса, энергии и массы) и уравнения состояния [10].

2.4 Модель ICON

ICON (Icosahedral Nonhydrostatic) — это набор моделей, созданных Немецкой метеорологической службой (DWD). Она является гибкой, масштабируемой и высокопроизводительной системой моделирования для прогнозирования погоды, климата и окружающей среды.

Модель GME является предшественником ICON, которая начала оперативную работу в декабре 1999 года и была первой в мире действующей моделью NWP, использующей икосаэдрическую сетку. Эта базовая структура сетки была сохранена и в ICON. По сравнению с традиционными подходами, такими как широтно-долготная сетка, икосаэдрические сетки обеспечивают практически равномерное покрытие земного шара, что позволяет избежать так

называемой проблемы полюсов, связанной со схождением меридианов в широтно-долготных сетках, которая создаёт трудности для эффективной вычислительной реализации.

Построение сетки начинается с икосаэдра, вписанного в сферу. Соединение 12 вершин икосаэдра геодезическими линиями даёт 20 равносторонних сферических треугольников с длиной грани около 7054 км. Итеративное деление (например, бисекция, трисекция) сторон треугольников позволяет получить модельную сетку с требуемым пространственным разрешением. Эффективный размер ячейки модельной сетки определяется как квадратный корень из средней площади сферических треугольников. В текущей рабочей версии глобальная сетка ICON состоит из 2 949 120 треугольников, что соответствует средней площади 173 км² и, следовательно, эффективному размеру сетки около 13 км. Все скалярные переменные прогностической модели (например, температура, плотность, количество влаги) расположены в центре треугольников, в то время как составляющие ветра, нормальные к границам, находятся в средних точках границ.

Наиболее важные прогностические переменные: плотность воздуха и виртуальная потенциальная температура, горизонтальная и вертикальная составляющая скорости ветра, влажность, количество облачности, а также осадки, в твердом и жидком состоянии. Также дополнительно над сушей рассчитывают температуру почвы, ее влажность и при наличии снега его водный эквивалент и плотность. Кроме адиабатических процессов также рассчитываются и не адиабатические процессы, такие как радиация, турбулентность, образование облачности и осадки. Для описания этих процессов используется параметризация, т.к. их размер меньше, чем шаг сетки.

Существует три основные модели ICON: ICON-D2 для Центральной Европы, ICON7 для Европы в целом и ICON13 для всего мира. Таким образом, это одновременно гиперлокальная, региональная и глобальная модель прогнозирования погоды [11].

Основные преимущества прогноза погоды, рассчитанного на основании модели ICON:

- Высокое пространственное разрешение;
- Шаг прогноза 1 час;
- Модель обновляется восемь раз в день, каждые три часа.

Основные недостатки прогноза погоды, рассчитанного на основании модели ICON:

- Глубина прогноза 5 дней
- Требуется значительных вычислительных мощностей;

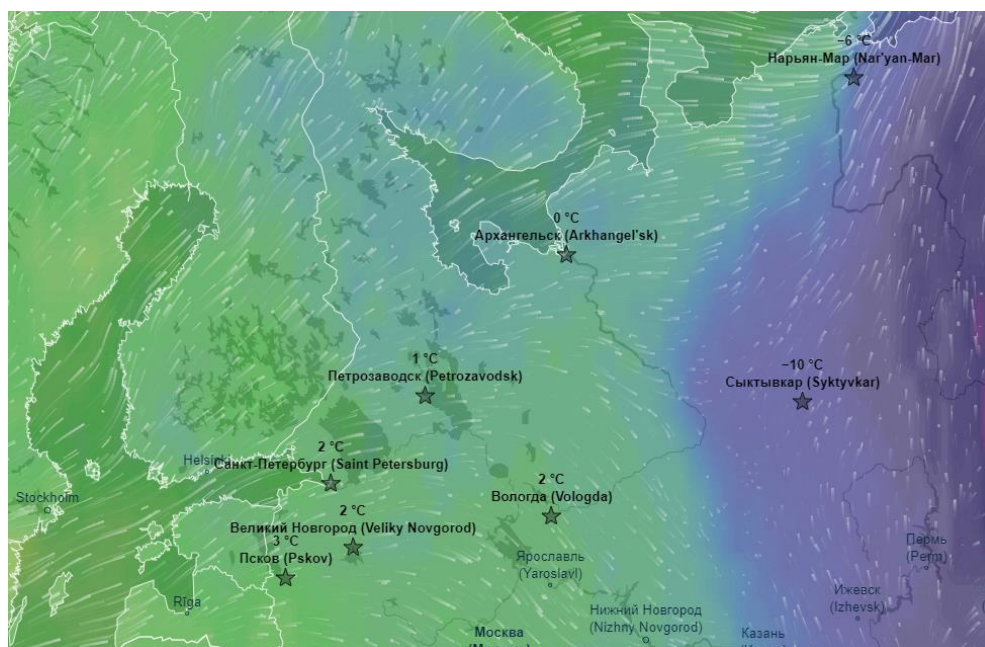


Рисунок 2.1 - Прогноз погоды на сутки для северо-запада ЕТР с использованием модели ICON (сайт www.ventusky.com).

2.5 Модель ПЛАВ

Глобальная полулагранжева конечно-разностная модель прогноза полей в свободной атмосфере разработана в ФГБУН «Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН» и ФГБУ «Гидрометцентр России».

Разработка модели ПЛАВ началась в 1995 году, после выхода статьи Р. Бэйтса и Й. Ли, которая была посвящена полулагранжевой двумерной модели

мелкой воды на сфере, основанной на уравнениях потенциального вихря. Модель ПЛАВ10 является существенно усовершенствованной версией модели ПЛАВ20. Применение потенциальной завихренности в качестве прогностической переменной в трехмерном случае затруднено, поэтому в модели ПЛАВ используется вертикальный компонент абсолютной завихренности.

Модель ПЛАВ состоит из блока решения уравнений динамики атмосферы (динамического ядра) собственной разработки и набора параметризаций подсеточного масштаба, в основном заимствованных.

Оригинальными особенностями блока решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ являются применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации не адвективных слагаемых уравнений и использование вертикальной компоненты абсолютного вихря и дивергенции в качестве прогностических переменных. Для модели атмосферы, основанной на переменных «вертикальный компонент абсолютной завихренности – горизонтальная дивергенция», важным элементом является быстрый и точный алгоритм восстановления компонент горизонтальной скорости ветра [12].

Для расчета прогнозов в полулагранжевой модели с переменным шагом сетки в качестве исходных данных применяются:

- поля оперативного объективного анализа на стандартных изобарических уровнях с пространственным разрешением $0,5^\circ$ по долготе и широте;
- объективный анализ температуры и относительной влажности на высоте 2 м и в слое почвы;
- данные NCEP по высоте снежного покрова и температуре поверхности океана, представленные на модельной сетке.

Системы глобального среднесрочного прогнозирования ПЛАВ10 имеет: горизонтальное разрешение $0,1^\circ$ по долготе, разрешение по широте меняется от $0,13^\circ$ (11-14 км) в Южном полушарии и до $0,08^\circ$ (8-11 км) в средних широтах Северного полушария. Модель имеет 104 уровня по вертикали [13].

Основные преимущества прогноза погоды, рассчитанного на основании модели ПЛАВ:

- Высокая точность прогноза при минимальных вычислительных затратах;
- Высокое пространственное разрешение;
- Глубина прогноза до 10 дней.

Основные недостатки прогноза погоды, рассчитанного на основании модели ПЛАВ:

- Модель обновляется дважды в день;
- Шаг прогноза от 3 до 12 часов в зависимости от заблаговременности прогноза.

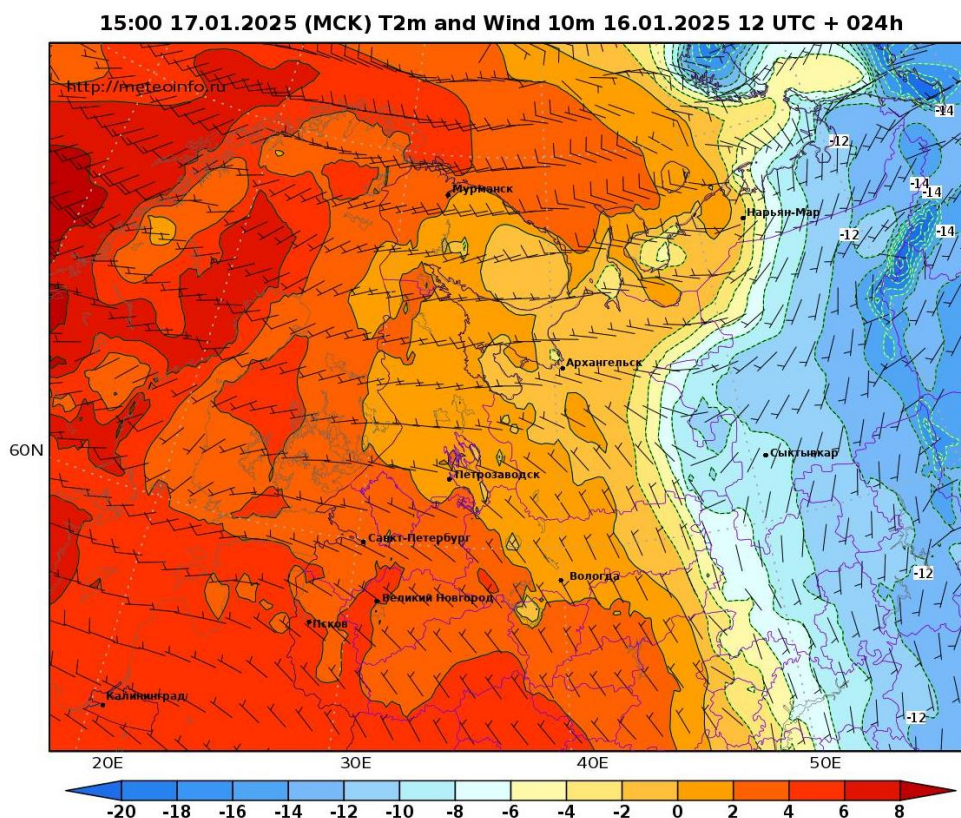


Рисунок 2.2 - Прогноз погоды на сутки для северо-запада ЕТР с использованием модели ПЛАВ (сайт <https://meteoinfo.ru/plav-forc-rus1>).

Глава 3. Анализ успешности прогнозов температуры воздуха

3.1 Порядок составления краткосрочных прогнозов погоды

Краткосрочный прогноз погоды — это прогноз метеорологических величин и явлений погоды на период от 12 до 72 ч.

Оперативно-прогностические подразделения составляют прогнозы погоды ежедневно в период с 8 до 12 ч местного времени по территории ответственности или пункту.

В прогнозы погоды общего назначения включается следующая информация о количественных и качественных характеристиках метеорологических величин: облачность, осадки (с характеристикой фазового состояния и, при необходимости, продолжительности), направление и скорость ветра, минимальная (ночь) и максимальная (день) температура воздуха.

В прогнозах погоды по пункту дополнительно включают аномальный ход температуры, превышающий 5 °С.

В прогнозе погоды последовательность представления метеорологических величин и явлений погоды определяется оперативно-прогностическим подразделением исходя из практики и природно-климатических особенностей региона.

В прогнозы погоды общего назначения включается информация о таких явлениях как: гроза, град, шквал, туман (мгла), гололед, изморозь, налипание (отложение) мокрого снега на проводах и деревьях, метель (в том числе низовая), пыльная (песчаная) буря, гололедица, снежные заносы, заморозки в воздухе и/или на поверхности почвы, сильная жара, сильный мороз, аномально жаркая (холодная) погода [14].

Прогноз погоды на первые сутки составляется отдельно на ночь и на день. Если характер погоды ожидается однородным, то допускается прогноз погоды на сутки давать общим текстом, при этом указав отдельно прогнозируемые значения минимальной и максимальной для ночи и дня соответственно. Если ожидается, что температура воздуха в период действия прогноза погоды на сутки не будет изменяться более чем на 2 °С, то разрешается указывать одно

прогнозируемое значение температуры в течение суток. Период действия прогноза погоды на ночь и на день ограничивается временем утреннего и вечернего измерения осадков.

Прогноз погоды на вторые и третьи сутки составляют для каждого суток раздельно. Если характер погоды в течение этого периода ожидается однородным, то разрешается составлять один прогноз погоды на двое суток [14].

3.2 Оценка успешности прогноза температуры воздуха

Прогнозы погоды общего назначения должны быть обязательно оценены, для определения их эффективности и улучшения методов прогнозирования метеорологических параметров и погодных явлений.

Оправдываемость является основным показателем успешности прогноза погоды.

Прогноз всех метеорологических величин, кроме прогноза количества осадков, оценивается в альтернативной форме: «прогноз оправдался», в таком случае оправдываемость прогноза равна 100 % или «прогноз не оправдался», что говорит о том, что оправдываемость прогноза 0 %.

Оценка оправдываемости прогноза температуры воздуха осуществляется с помощью сравнения прогнозируемых температур воздуха (днем – максимальной, ночью – минимальной) с фактически измеренными максимальными и минимальными значениями температуры воздуха на тех наблюдательных подразделениях, данные наблюдений которых используются для оценки прогноза [14].

Оправдавшимся прогноз температуры воздуха по пункту считается ($P_{\text{п}} = 100 \%$), если фактическая температура воздуха (днем – максимальная, ночью – минимальная) находится в пределах прогнозируемой градации или отличается от крайних значений градации не более чем на 2°C . Если фактическая максимальная (минимальная) температура отличается от крайних значений прогнозируемой градации более чем на 2°C , то прогноз считается не оправдавшимся, т. е. $P_{\text{п}} = 0 \%$ [14].

Средняя абсолютная ошибка дополнительно рассчитывается для характеристики точности прогноза максимальной и минимальной температуры воздуха по пункту отдельно для максимальной и минимальной температуры по формуле:

$$\bar{\delta}_{\text{абс}(t)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |t_{\text{п}} - t_{\phi}|_i, \quad (3.1)$$

где, t_{ϕ} - фактическое значение максимальной или минимальной температуры воздуха на каждом НП, находящимся в пункте;

$t_{\text{п}}$ - прогностическое значение максимальной или минимальной температуры воздуха;

N - количество пар "прогноз – наблюдение".

Средняя абсолютная ошибка является средним арифметическим значением абсолютных величин разности членов каждой из пар прогноз – наблюдение. Она менее подвержена влиянию больших ошибок и не зависит от средней ошибки. Средняя абсолютная ошибка идеального прогноза равняется 0 и при увеличении ошибки прогноза растет.

Также для оценки успешности прогнозов рассчитывается средняя ошибка, которая является мерой общей систематической ошибки для непрерывных переменных, по следующей формуле:

$$\bar{\delta}_{(t)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{\text{п}} - t_{\phi}) = \bar{t}_{\text{п}} - \bar{t}_{\phi}, \quad (3.2)$$

Средняя ошибка является разностью среднего значения прогноза и среднего значения наблюдений. При положительном значении средней ошибки прогнозы в среднем завышаются, при отрицательном значении соответственно занижаются, т.е. имеется систематическое смещение [15].

3.3 Сравнительный анализ количества ошибочных прогнозов температуры воздуха по прогностическим моделям ICON и ПЛАВ

В таблице 3.1 и 3.2 представлено количество дней с ошибочными прогнозами температуры воздуха по месяцам за период с 01.11.2024 по 31.03.2025 гг. полученных с помощью прогностических моделей ICON и ПЛАВ.

Таблица 3.1 - Количество ошибочных прогнозов по модели ICON за период исследования.

ICON						
	ноябрь	декабрь	Январь	февраль	март	итого
В. Новгород	0	0	0	2	1	3
Вологда	1	2	0	3	0	6
Петрозаводск	0	1	2	2	1	6
Псков	0	0	0	3	1	4
Санкт-Петербург	0	0	0	2	1	3
Итого	1	3	2	12	4	22

Таблица 3.2 - Количество ошибочных прогнозов по модели ПЛАВ за период исследования.

ПЛАВ						
	ноябрь	декабрь	Январь	Февраль	март	Итого
В. Новгород	0	1	0	3	2	6
Вологда	1	2	2	6	2	13
Петрозаводск	1	2	3	8	7	21
Псков	1	0	1	4	3	9
Санкт-Петербург	2	0	1	3	5	11
Итого	5	5	7	24	19	60

Анализируя таблицы 3.1 и 3.2, можно сделать следующие выводы. Модель ICON допустила 22 ошибки, в то время как модель ПЛАВ допустила 60 ошибок, что почти в три раза больше, чем у модели ICON.

Наибольшее количество ошибочных прогнозов температуры воздуха у обеих моделей наблюдается в феврале. У модели ICON 12 ошибок, а у модели

ПЛАВ - 24 ошибки. Наименьшее количество ошибочных прогнозов температуры воздуха у модели ICON наблюдалось в ноябре (1 ошибка), а у модели ПЛАВ в ноябре и декабре (5 ошибок). Ухудшение качества прогнозов в феврале-марте может быть связано с сезонными факторами, например такими как: частая смена воздушных масс, резкие температурные колебания и аномальные явления погоды.

Наибольшее количество ошибок у модели ICON наблюдалось в таких городах как Вологда и Петрозаводск (6 ошибок), а у модели ПЛАВ в Петрозаводске (21 ошибка). Таким образом наиболее проблемным городом для обеих моделей является Петрозаводск, что может быть связано с влиянием Онежского и Ладожского озер, а также сложным рельефом.

Наименьшее количество ошибочных прогнозов для модели ICON наблюдается в городах Великий Новгород и Санкт-Петербург (3 ошибки для каждого города), а для модели ПЛАВ в городе Великий Новгород (6 ошибок).

Рассмотрим также положительные и отрицательные отклонения прогностического значения максимальной температуры воздуха от фактического представленные в таблице 3.2, т.е. случаи завышения и занижения неуспешных прогнозов температуры воздуха.

Таблица 3.3 - Количество случаев завышения и занижения неуспешных прогнозов температуры воздуха по моделям ICON и ПЛАВ.

	ICON		ПЛАВ	
	Завышение	занижение	Завышение	занижение
В. Новгород	1	2	4	2
Вологда	2	4	8	5
Петрозаводск	3	3	7	14
Псков	2	2	2	7
Санкт-Петербург	0	3	0	11
Всего	8	14	21	39

Анализируя таблицу 3.3, можно отметить, что для обеих моделей характерно занижение прогнозируемой температуры воздуха, в случае

неуспешных прогнозов температуры воздуха. Количество заниженных прогнозов почти в 2 раза больше, чем завышенных по обеим моделям.

При рассмотрении значений, полученных с помощью модели ICON в таких городах как Петрозаводск и Псков наблюдается одинаковое количество случаев завышения и занижения неуспешных прогнозов температуры воздуха (по 3 и по 2 случая соответственно). Также видно, что в Санкт-Петербурге не наблюдались завышенные прогнозы температуры воздуха по обеим моделям. При прогнозе по модели ПЛАВ в Вологде и Великом Новгороде наблюдается больше завышений, чем занижений.

Далее рассмотрим повторяемость неуспешных прогнозов температуры воздуха, представленную на рисунках 3.1 и 3.2

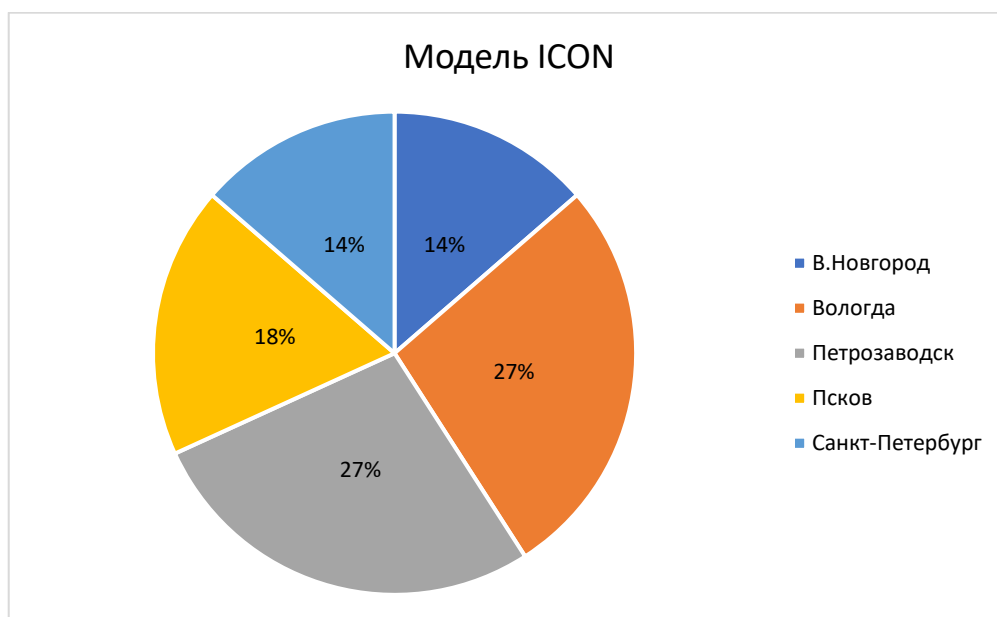


Рисунок 3.1 - Повторяемость неуспешных прогнозов температуры воздуха по модели ICON за весь период исследования (%).

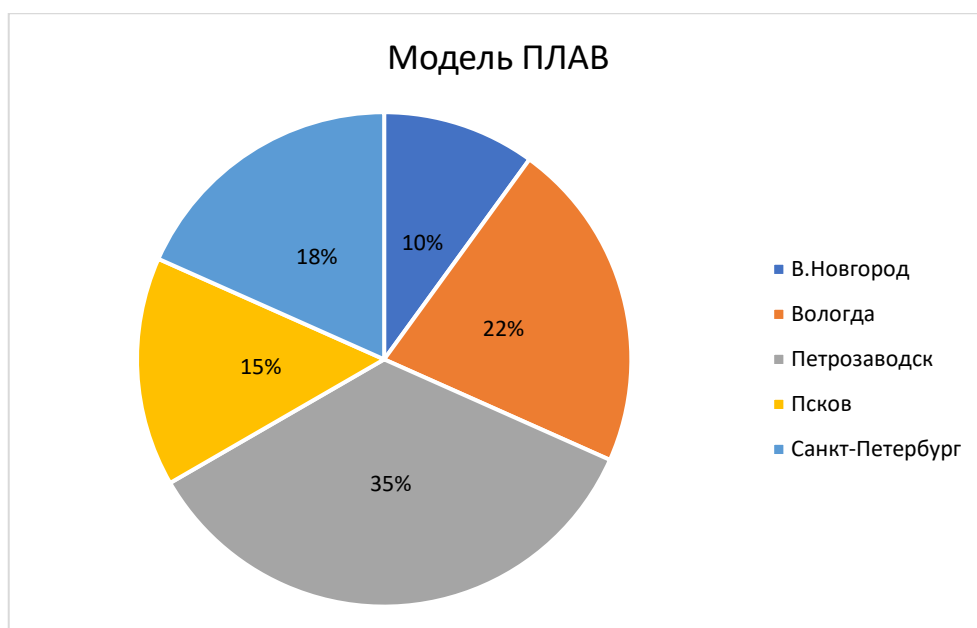


Рисунок 3.2 - Повторяемость неуспешных прогнозов температуры воздуха по модели ПЛАВ за весь период исследования (%).

По модели ICON наибольший процент неудачных прогнозов наблюдается в Вологде и Петрозаводске — по 27% в каждом городе. Эти два города составляют более половины всех неудачных прогнозов. Псков составил 18% от общего числа неудачных прогнозов. Наименьший процент неудачных прогнозов отмечается в Великом Новгороде и Санкт-Петербурге — по 14% в каждом городе.

В случае модели ПЛАВ распределение неудачных прогнозов выглядит иначе. Наибольший процент неудачных прогнозов приходится на Петрозаводск — 35%. В Вологде этот показатель составляет 22%. Санкт-Петербург, Псков и Великий Новгород составляют 18%, 15% и 10% от общего числа неудачных прогнозов температуры воздуха.

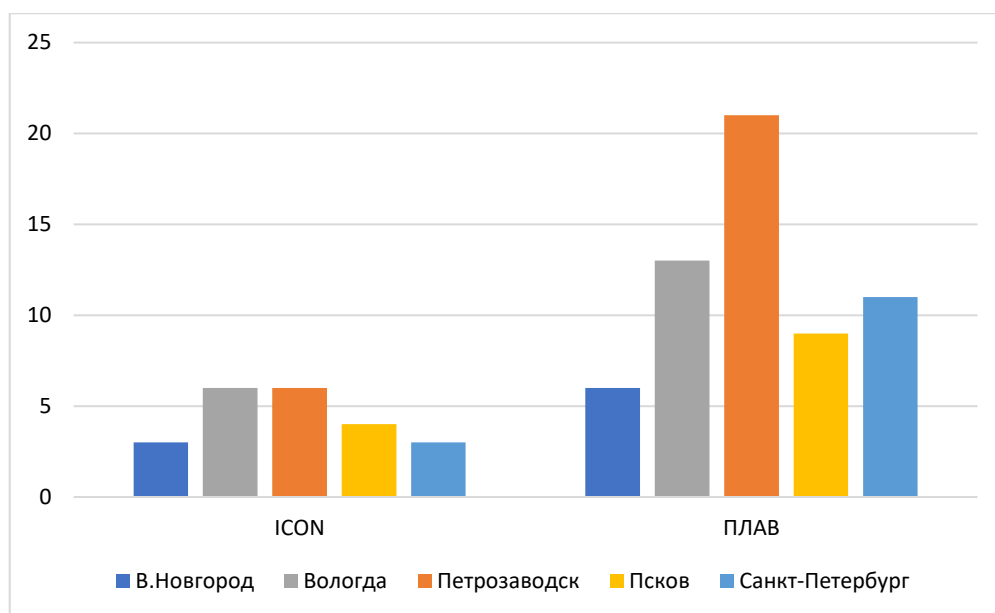


Рисунок 3.3 - Сравнение количества дней с ошибочными прогнозами температуры воздуха по моделям ICON и ПЛАН.

Модель ICON демонстрирует относительно равномерное распределение ошибок между городами, но наибольшее количество ошибок в таких городах как Вологда и Петрозаводск. В остальных городах количество дней с ошибками ниже. Модель ПЛАН показывает резкое увеличение количества дней с ошибками, по сравнению с моделью ICON, особенно в Петрозаводске (21 день — более чем в 3 раза больше, чем у ICON). В Вологде и Санкт-Петербурге также наблюдается значительное различие между двумя моделями. В остальных городах рост менее выражен, но всё равно заметен.

Ниже представлено распределение количества ошибочных прогнозов по территории исследования (рис. 3.4 и 3.5).

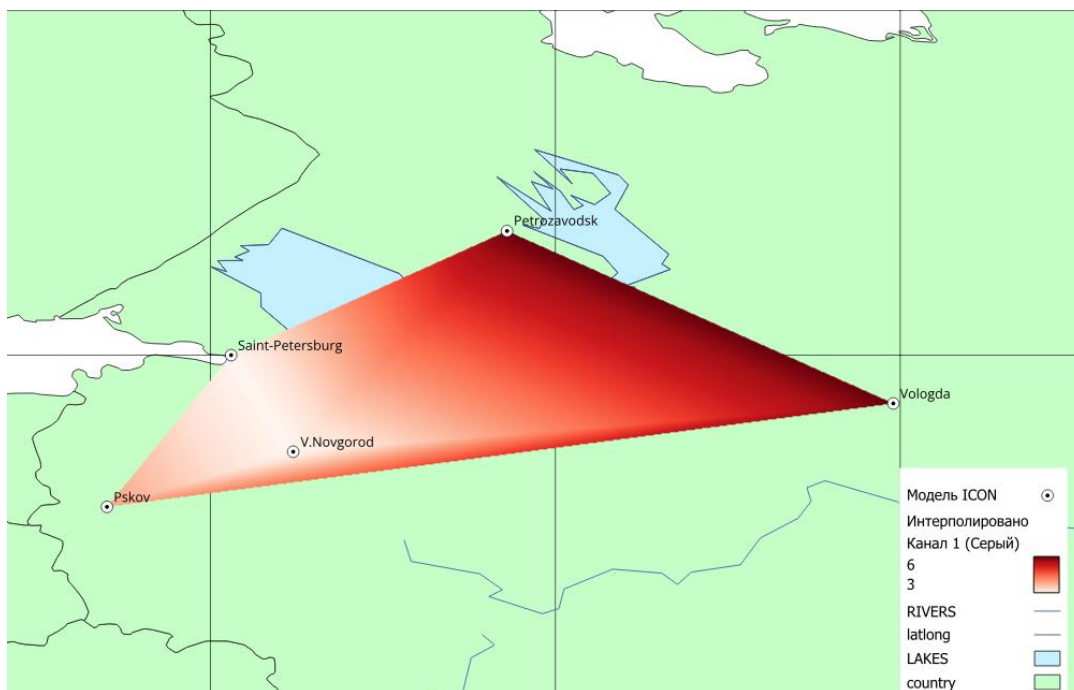


Рисунок 3.4 - Распределение ошибочных прогнозов по территории исследования, полученных с помощью модели ICON за период исследования.

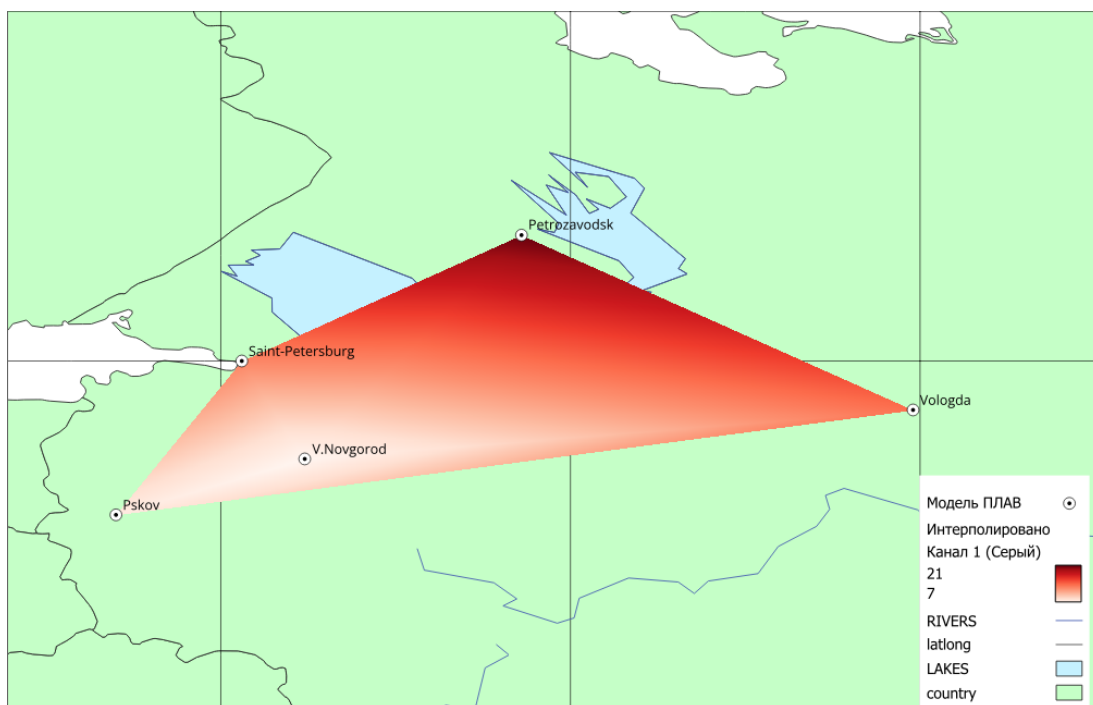


Рисунок 3.5 - Распределение ошибочных прогнозов по территории исследования, полученных с помощью модели ПЛАВ за период исследования.

Анализируя пространственное распределение ошибочных прогнозов температуры воздуха, представленное выше, можно отметить, что ошибки

распределены по территории исследования неравномерно. Количество ошибочных прогнозов увеличивается при продвижении на северо-восток. Для обеих моделей наименьшее количество ошибочных прогнозов температуры воздуха расположено в западной части территории. Такое распределение может быть связано с особенностями рельефа и местного климата, плотностью распределения метеостанций, которая выше в районе Санкт-Петербурга, Великого Новгорода и Пскова, при продвижении на северо-восток плотность метеостанций уменьшается. Для обеих моделей наименьшее количество ошибочных прогнозов температуры воздуха сконцентрировано в районе Великого Новгорода. Великий Новгород расположен на равнинной территории в отдалении от крупных водных объектов, которые могут вносить свой вклад в формирование климата.

3.4 Расчёт критериев успешности прогноза температуры воздуха для Северо-Запада Европейской территории России.

Проанализируем показатели успешности прогнозов погоды за период с 1 ноября 2024 года по 31 марта 2025 года.

Показатели средней абсолютной и средней систематической ошибки прогноза температуры воздуха по моделям ICON и ПЛАВ для каждого пункта, рассчитанные за выбранный период представлены в таблице 3.4.

Анализ полученных данных позволяет сделать выводы о качестве прогнозов и целесообразности применения таких прогностических моделей, как ICON и ПЛАВ для прогноза максимальной температуры.

Таблица 3.4 - Показатели средней абсолютной и систематической ошибки прогноза температуры воздуха по моделям ICON и ПЛАВ

	средняя абсолютная ошибка, °С		средняя систематическая ошибка, °С	
модель	ICON	ПЛАВ	ICON	ПЛАВ
Заблаговременность	24 ч			
В. Новгород	0,9	1,1	-0,2	-0,1

Продолжение таблицы 3.4

Вологда	1,1	1,2	-0,3	-0,2
Петрозаводск	1,1	1,4	-0,1	-0,3
Псков	0,9	1,2	-0,3	-0,5
Санкт-Петербург	1,1	1,4	-0,9	-1,1

Модель ICON показывает меньшую среднюю абсолютную ошибку, чем ПЛАВ. Это свидетельствует о том, что ICON обеспечивает более высокую точность прогнозов температуры воздуха во всех городах. Модель ICON в среднем на 0,2-0,4 °С точнее, чем модель ПЛАВ. Наибольшее преимущество модели ICON (0,3°С) наблюдается в Петрозаводске и Санкт-Петербурге. Прогнозы, наиболее близкие к идеальным наблюдаются у модели ICON в таких городах, как В. Новгород и Псков.

Средняя систематическая ошибка не имеет модуля и поэтому показывает свойство прогностической модели завышать или занижать метеорологический параметр. ICON, как правило, имеет меньшую среднюю систематическую ошибку, чем ПЛАВ, что соответствует значительно меньшим систематическим отклонениям. Обе модели имеют тенденцию занижать прогнозируемую температуру во всех городах. Также можно отметить, что наибольшая средняя систематическая ошибка наблюдается в Санкт-Петербурге для обеих моделей, а наиболее близкая к нулю в Петрозаводске для модели ICON и в Великом Новгороде для модели ПЛАВ. В Санкт-Петербурге наиболее выражено занижение температур у обеих моделей (-0,9 и -1,1°С).

Рассмотрим изменение не осредненной систематической ошибки за весь период исследования по моделям ICON и ПЛАВ (рис. 3.7-3.8):

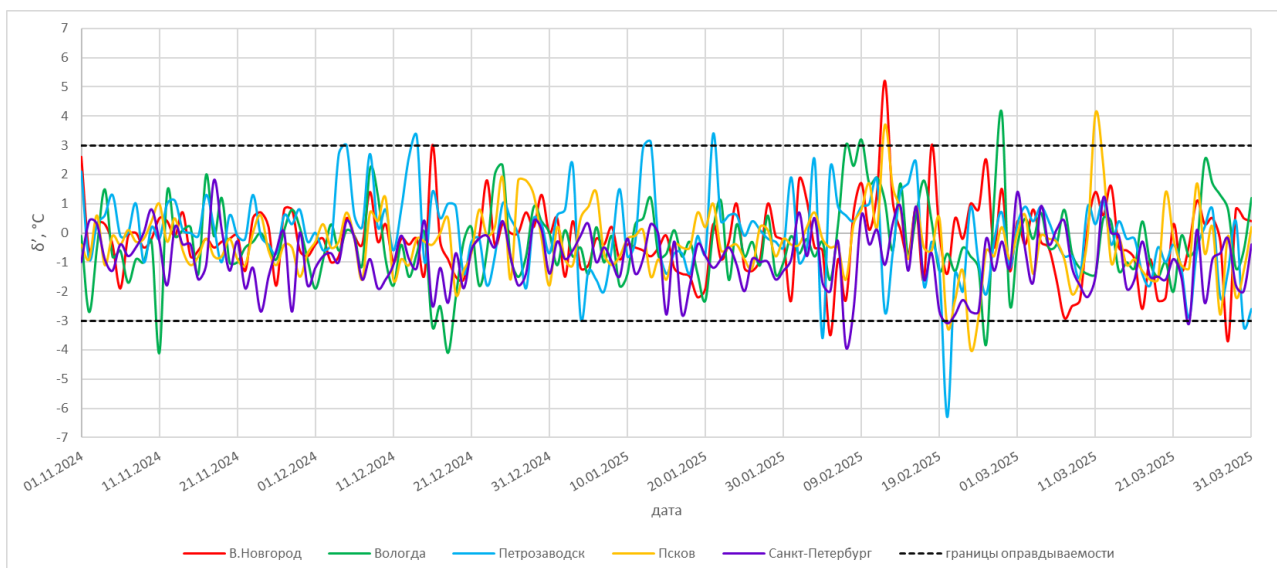


Рисунок 3.6 - График хода систематической ошибки прогноза на 24 ч за весь период исследования по модели ICON

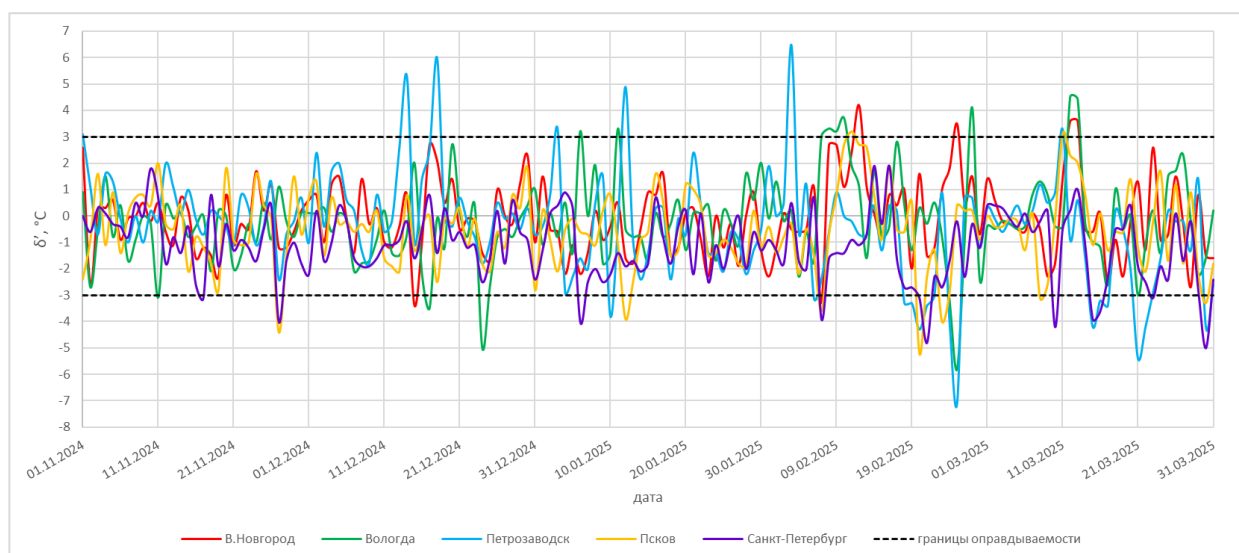


Рисунок 3.7 - График хода систематической ошибки прогноза на 24 ч за весь период исследования по модели ПЛАВ

Анализируя графики можно отметить, что все города демонстрируют колебания систематической ошибки, но тем не менее в большинстве случаев в течении исследуемого периода эти колебания находятся в пределах от $-3,0^{\circ}\text{C}$ до $3,0^{\circ}\text{C}$, что по критериям Гидрометцентра России считается успешным прогнозом температуры воздуха. В основном для каждой модели наблюдается синхронный ход кривых систематической ошибки, но можно выделить дни, когда для разных

городов наблюдались противоположные значения систематической ошибки: 06.01.25, 12.01.25, 25.02.25. Наиболее существенное различие наблюдалось 25.02.25 у модели ПЛАВ, в этом случае разность систематической ошибки между городами Петрозаводск и Великий Новгород составила 10,6 °С. У модели ICON противоположные ошибки за исследуемый период не наблюдались.

В некоторых случаях наблюдались групповые ошибки (ошибка прогноза максимальной температуры воздуха более чем в одном городе). Для модели ICON: 12.02.25, 20.02.25, а для модели ПЛАВ: 27.11.24, 06.01.25, 12.01.25, 07.02.25, 20.02.25, 21.02.25, 24.02.25, 25.02.25, 11.03.25, 12.03.25, 13.03.25, 15.03.25, 16.03.25, 30.03.25. Например, при прогнозе на 30.03.25 модель ПЛАВ ошиблась сразу в трех городах: Петрозаводск, Санкт-Петербург и Псков и систематическая ошибка соответственно составила -4,2 °С, -5 °С, -3,3 °С.

Также наблюдались совместные ошибки моделей ICON и ПЛАВ, т.е. модели ошиблись в одном и том же городе: 11.11.24, 14.12.24, 07.02.25, 09.02.25, 12.02.25, 20.02.25, 23.02.25, 25.02.25, 27.02.25, 11.03.25, 23.03.25, 30.01.25. Например, 20.02.25 наблюдались ошибки у модели ICON и ПЛАВ одновременно в таких городах как: Петрозаводск, Санкт-Петербург, Псков. Систематическая ошибка соответственно составила для модели ICON: -6,3 °С, -3,1 °С, -3,2 °С, а для модели ПЛАВ: -4,3 °С, -3,1 °С, -5,2 °С. Обе модели занизили прогнозируемую температуру во всех городах. Кроме того, наблюдались и одиночные ошибки (модель ошиблась только в одном городе в день прогноза).

Модель ICON занижала температуру воздуха в 14 случаях, а завышала в 8 случаях. Модель ПЛАВ занижала температуру воздуха в 39 случаях, а завышала в 21. Можно отметить, модели в основном завышают температуру воздуха.

Наибольшее значение отклонения прогнозируемой температуры от идеального прогноза у модели ICON наблюдалось в городе Петрозаводске при прогнозе на 20.02.2025 и составило -6,3 °С, а для модели ПЛАВ при прогнозе на 25.02.2025 также в городе Петрозаводске и составило -7,1 °С.

Также видно, что наблюдается тенденция к увеличению количества ошибок прогноза температуры воздуха в зимний период (декабрь-февраль), что может указывать на сложность прогнозирования в холодное время года.

3.5 Анализ синоптических ситуаций, сопутствующих неуспешным прогнозам максимальной температуры воздуха.

В ходе научно-исследовательской работы были проанализированы синоптические ситуации, сопутствующие ошибочным прогнозам температуры воздуха. Целью анализа является выявление наиболее типовых синоптических ситуаций. Для анализа синоптических ситуаций использовались карты Гидрометцентра России [16].

В таблице 3.5 представлено количество случаев завышения и занижения неуспешных прогнозов температуры в зависимости от типа синоптической ситуации за период с 01.11.2024 по 31.03.2025 гг. полученных с помощью прогностических моделей ICON и ПЛАВ.

Таблица 3.5 - Количество случаев завышения и занижения неуспешных прогнозов температуры в зависимости от типа синоптической ситуации.

	Модель			
	ICON		ПЛАВ	
	занижение	Завышение	занижение	завышение
Малоградиентное поле	6	4	14	13
Седловина	3	2	1	3
Зона взаимодействия между полем низкого и высокого давления	4	1	10	1
Передняя и тыловая часть циклона	0	0	3	0
Теплый сектор циклона	0	0	2	2
Гребень	0	0	3	2
Другое	1	1	6	0

Анализируя таблицу 3.5, можно сделать следующие выводы. Обе модели часто дают неуспешные прогнозы в условиях малоградиентного поля, причём ошибки распределяются относительно равномерно между занижением и

завышением. При седловинах модель ПЛАВ склонна к завышению, у модели ICON наблюдалось равномерное распределение случаев завышения и занижения. В зонах взаимодействия между полями низкого и высокого давления модели склонны к занижению прогнозируемой температуры воздуха. В синоптической ситуации соответствующей передней и тыловой частям циклона модель ПЛАВ склонна к занижению прогнозируемой температуры воздуха. В теплом секторе циклона и при гребнях у модели ПЛАВ наблюдалось в целом равномерное распределение между случаями завышения и занижения.

Рассмотрим повторяемость синоптических ситуаций, сопутствующих неуспешным прогнозам температуры воздуха по моделям ICON и ПЛАВ (рис 3.8).

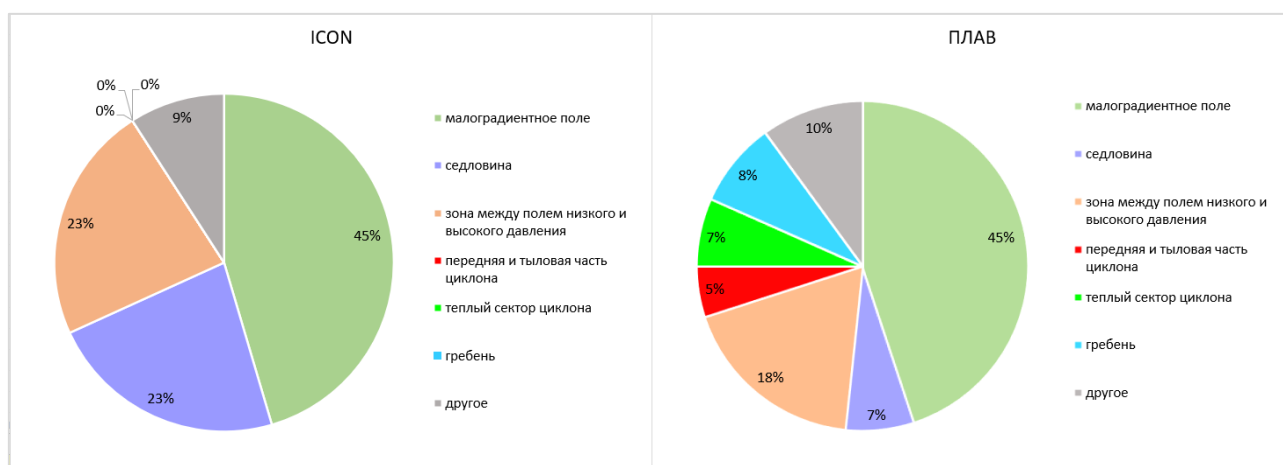


Рисунок 3.8 - Повторяемость синоптических ситуаций

В результате анализа синоптических ситуаций, сопутствующих неуспешным прогнозам максимальной температуры воздуха, можно сделать вывод о том, что ситуации, при которых наблюдаются неуспешные прогнозы достаточно разнообразны. Модели ICON и ПЛАВ показывают высокую повторяемость ошибок при малоградиентных полях 45%, они составляют почти половину от других типов синоптических ситуаций, наблюдавших над Северо-Западом Европейской территории России в период с 01.11.2024 по 31.03.2025 гг. На втором месте по повторяемости находятся зоны взаимодействия между

полями низкого и высокого давления, для модели ICON они составляют 23%, а для модели ПЛАВ 18%.

Таким образом наиболее типовая синоптическая ситуация при ошибочных прогнозах погоды — это малоградиентные поля.

Ошибки в малоградиентных полях связаны с преобладанием локальных и мелкомасштабных процессов, таких процессы являются подсеточными, т.е. имеют размеры меньше, чем шаг сетки и соответственно не могут быть вычислены. При таких синоптических процессах возрастает влияние процессов облакообразования, конвекции, характеристик подстилающей поверхности на температурный режим. Например радиационные характеристики облачности зависят от ее типа, а конвекция является сложным физическим процессом, который нельзя описать с помощью уравнений, с ее помощью происходит перенос тепла и влаги от поверхности и образование облачности и осадков. Также в малоградиентных полях на атмосферу влияет планетарный пограничный слой, который нагревает атмосферу, насыщает ее влагой.

Такие процессы учитываются моделями с помощью параметризации, которая неточно описывает процесс.

В случае с синоптическими ситуациями, связанными с зонами взаимодействия между полями низкого и высокого давления ошибки, могут связаны с неточностями начальных данных, неверном определении скорости и направления смещения барического поля, его интенсивности.

Ошибка обеих моделей для Петрозаводска, Санкт-Петербурга и Пскова.

При прогнозе на 20.02.2025 г. модели ICON и ПЛАВ ошиблись одновременно в трех городах: Петрозаводске, Пскове и Санкт-Петербурге. Во всех случаях прогноз максимальной температуры воздуха был занижен по отношению к фактической температуре. Максимальная ошибка у модели ICON наблюдалась по городу Петрозаводску и составила $-6,3^{\circ}\text{C}$, а у модели ПЛАВ по Пскову и составила $-5,3^{\circ}\text{C}$. Так же в этот день наблюдалась максимальная

ошибка по модели ICON за весь период исследования, она составила $-6,3^{\circ}\text{C}$ и наблюдалась в Петрозаводске.

Рассмотрим развитие синоптической ситуации с 19.02.2025 по 20.02.2025 гг.

19.02.25 в 12 ч ВСВ погода на территории исследования определялась зоной взаимодействия между малоградиентным гребнем антициклона, центр антициклона располагался в районе Праги и давление в нем составляло 1033 гПа и малоградиентной ложбиной от циклона с центром в районе о. Новая Земля и давлением в центре 992 гПа. В течении суток гребень антициклона смещался с запада, вследствие чего атмосферное давление на территории исследования начало повышаться, ложбина заполнилась. 20.02.25 в 12 ч ВСВ область исследования оказалась под воздействием северо-восточной периферии антициклона.

19.02 в 12 ч ВСВ температура по области исследования составила $-3\dots -7^{\circ}\text{C}$, благодаря облачности ночью воздух не смог остыть сильнее $-10\dots -14^{\circ}\text{C}$ и в день прогноза высокое давление способствовало малооблачной погоде и прогреву воздуха вследствие солнечной погоды и температура воздуха составила $-1\dots -3^{\circ}\text{C}$. Ветер сменил свое направление с северо-западного на юго-западное, скорость ветра значительно не изменилась и составляла 2-3 м\с. Осадков не наблюдалось.

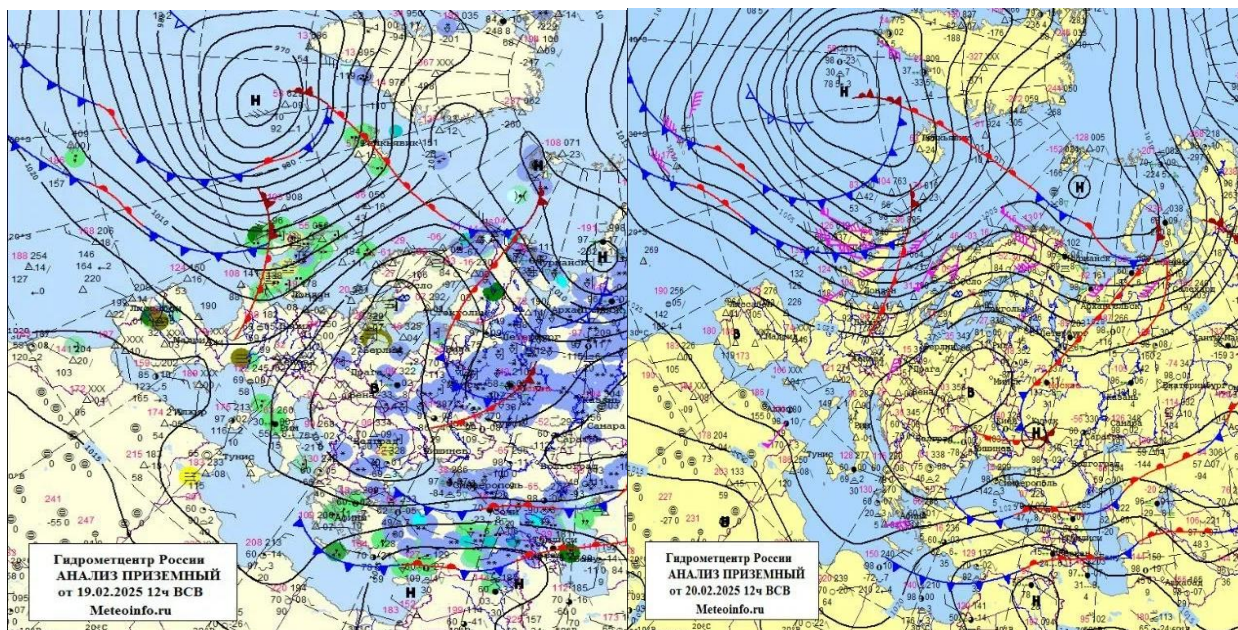


Рисунок 3.9- Синоптическая ситуация за период с 19.02.2025 по 20.02.2025

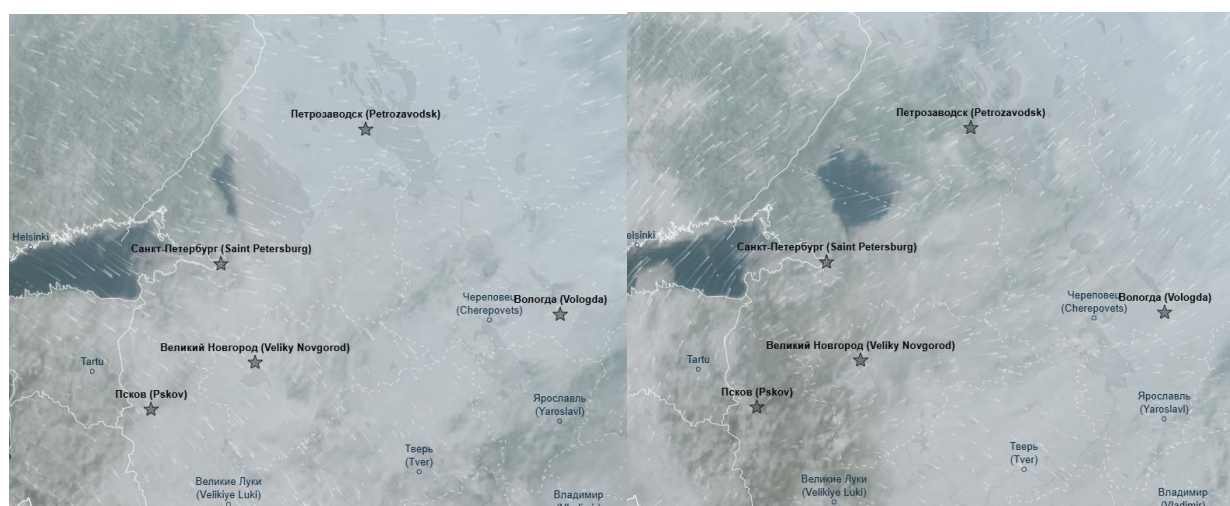


Рисунок 3.10 - Спутниковые снимки за 19.02.25 и 20.02.25 в 12 ч ВСВ

Таким образом можно предположить, что на ошибку прогноза температуры воздуха могли повлиять следующие факторы:

- Данные города находились в зоне более высоких градиентов между гребнем и ложбиной, чем остальные станции. В данном случае модели могли не учесть скорость и траекторию смещения гребня, а также неточно рассчитать скорость заполнения. В такой сложной ситуации даже небольшие ошибки в

расчете положения и интенсивности барических систем могут привести к значительным ошибкам в прогнозе.

- Неточность параметризации подсеточных процессов. Малооблачная погода влияла на прогрев воздуха, а также на отражение коротковолновой радиации от снежного покрова, что могло быть не отмечено моделью.

Максимальная ошибка прогноза по модели ПЛАВ за весь период исследования

При прогнозе на 25.02.2025 г. модель ПЛАВ ошиблись одновременно в трех городах: Великом Новгороде, Петрозаводске и Вологде. В таких городах как Петрозаводск и Вологда прогноз максимальной температуры воздуха был занижен по отношению к фактической температуре, а в городе Великом Новгороде прогноз был завышен, и величина систематической ошибки соответственно составила $-7,1^{\circ}\text{C}$, $-5,8^{\circ}\text{C}$ и $3,5^{\circ}\text{C}$.

В этот день наблюдалась максимальная ошибка прогноза температуры воздуха за весь период исследования, она составила $-7,1^{\circ}\text{C}$ и была зафиксирована в городе Петрозаводск. Также в этот день наблюдалась наиболее существенное различие между противоположными значениями систематической ошибки и разность между городами Петрозаводск и Великий Новгород составила $10,6^{\circ}\text{C}$

Рассмотрим развитие синоптической ситуации с 24.02.2025 по 25.02.2025 гг.

24.02.25 Петрозаводск и Великий Новгород находилась в зоне между обширным барическим максимумом и циклонической системой, расположенной на северо-западе. В течении суток антициклон распространялся на север. Вологда находилась юго-восточнее от зоны взаимодействия циклона и антициклона, в малоградиентном поле повышенного давления. В Петрозаводске и Великом Новгороде наблюдалась облачная погода, в Вологде малооблачная погода.

24.02 в 12 ч ВСВ температура в Вологде и Великом Новгороде составила -4°C и -3°C , а в Петрозаводске 1°C . В ночные часы температура в Петрозаводске

составила -1°C , а в Вологде и Великом Новгороде -16°C и -8°C соответственно. Далее в течении дня температура начала повышаться и составила для Петрозаводска, Вологды и Великого Новгорода 5°C , 0°C и -2°C соответственно. В течении суток наблюдался ветер южных направлений 1-2 м/с, в ночные часы в Вологде и Великом Новгороде наблюдался штиль. Наличие малоградиентного поля повышенного давления и безоблачная погода благоприятствовали выхолаживанию и вследствие этого образованию в ночные часы очага холода в районе Ярославской области и на юге Вологодской области, а ветер южных направлений способствовал затоку холодного воздуха в Вологду и в следствие этого сильному понижению температуры воздуха в ночные часы.

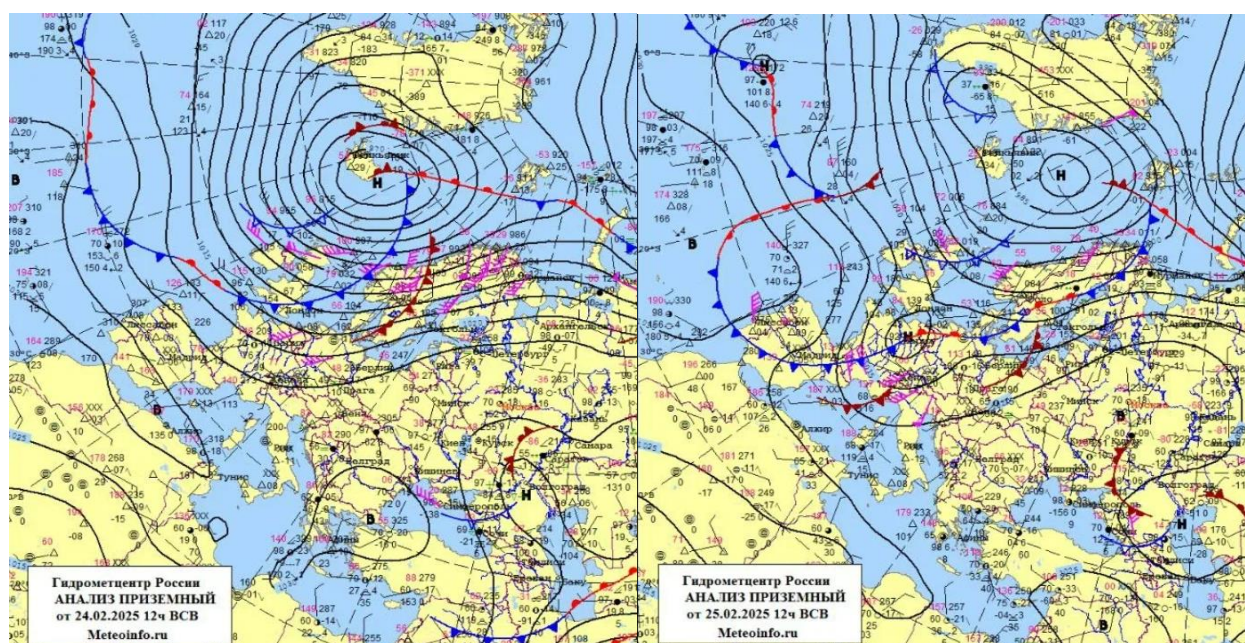


Рисунок 3.11 - Синоптическая ситуация за период с 24.02.2025 по 25.02.2025

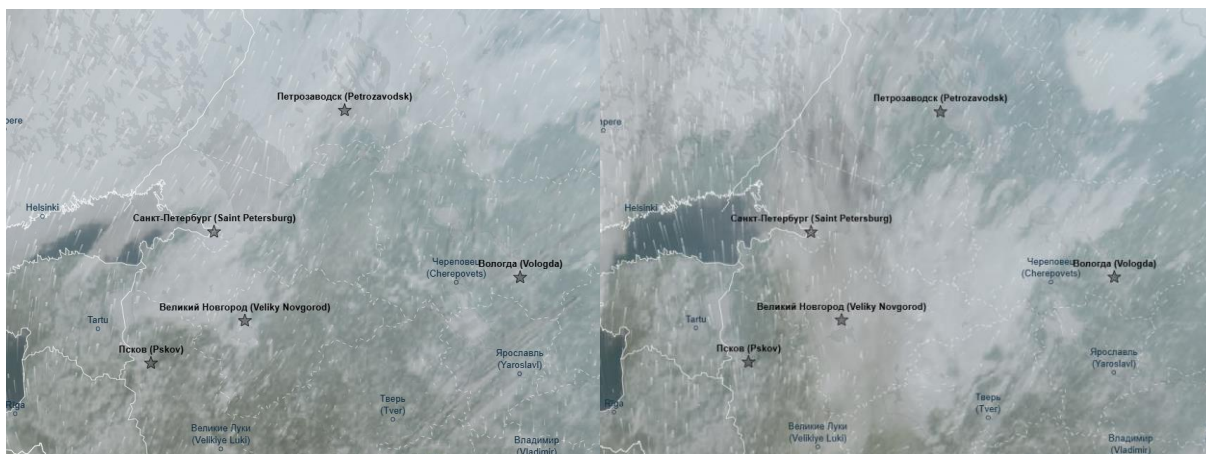


Рисунок 3.12 – Спутниковые снимки за 24.02.2025 и 25.02.2025

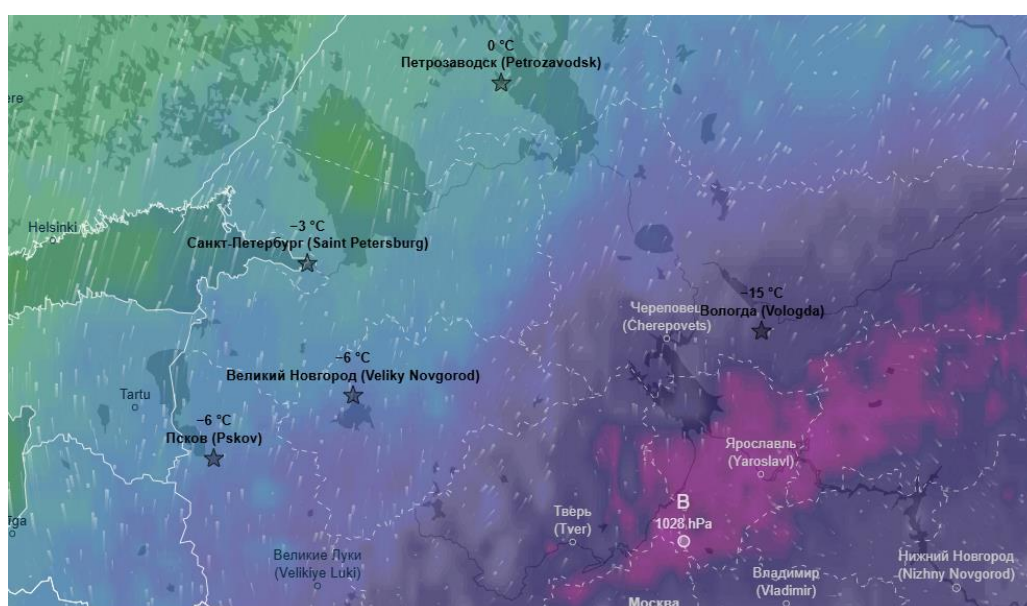


Рисунок 3.13 – Карта поля температуры за 06 ч ВСВ 25.02.2025

Таким образом можно предположить, что в данной синоптической ситуации главным фактором, влияющим на прогноз температуры воздуха, являлась облачность. Она определяет, насколько температура опустится в ночные часы и как сильно воздух прогреется днем. Радиационные характеристики облачности зависят от ее количества и типа. Облачность является сложным для прогнозирования параметром, т.к. она сильно изменчива и имеет небольшие значения в этом случае даже незначительные неточности в расчётах могут привести к неспешному прогнозу, также отсутствует достаточное количество измерений.

Ошибки прогноза температуры воздуха связанные с седловинами

Всего за период исследования наблюдалось 8 дней с седловинами, из них 6 дней содержали ошибочные прогнозы температуры воздуха, т.е в 75% от общего случаев наблюдались ошибочные прогнозы. Проанализировав синоптические условия в эти дни было невозможно выделить какие-то определенные закономерности.

Рассмотрим несколько наиболее интересных случаев ошибочных прогнозов в седловинах.

1. Рассмотрим синоптическую ситуацию сопутствующую неуспешному прогнозу температуры воздуха за 14.12.2024 г в Петрозаводске, в этот день ошиблись обе модели. Величина ошибки по модели ICON составила 3,3 °С, а по модели ПЛАВ 5,3°С. Также стоит отметить, что обе модели завысили результаты прогноза температуры воздуха.

Рассмотрим развитие синоптической ситуации 13.12.2024 по 14.12.2024 гг.

Над Финляндией и Кольским полуостровом располагалась барическая седловина, между циклоническим образованием, расположенным над Атлантикой и двухцентровым циклоном, расположенным над Европейской территорией России и Уралом, а поля высокого давления располагались над Европой и Шпицбергом. В течении суток седловина сместилась на юго-восток и область исследования оказалась под ее влиянием.

13.12.24 в 12 ч ВСВ центр первого циклона находился над Норвежским морем, давление в нем составляло 999 гПа, за 24 ч циклон углубился на 10 гПа и сместился по ныряющей траектории на юго-восток и его центр стал располагаться над Норвегией. Центр второго циклона находился в районе Перми, давление в нем составляло 984 гПа, за 24 ч циклон заполнился 8 гПа и сместился на северо-восток и наблюдался в районе полуострова Канин, давление в нем составляло 997 гПа и в течении суток он заполнился. Данные барические образования являлись высокоградиентными.

13.12.2024 погода в регионе исследования формировалась гребнем антициклона. Петрозаводск находился в тыловой части обширного циклона,

центр которого располагался в районе Перми, на границе с гребнем антициклона. 14.12.2024 погода в западной части региона исследования формировалась под влиянием передней части обширного циклона и таким образом в ночные и дневные часы наблюдались осадки и облачная погода, а Петрозаводск и Вологда находились в барической седловине, наблюдалась безоблачная погода, осадки отсутствовали. Наличие гребня антициклона способствовало мощному вторжению Арктического холодного воздуха.

13.12.2024 в 12 ч ВСВ температура воздуха в Петрозаводске составила -11°C . В ночные часы температура в Петрозаводске понизилась и составила -13°C . Далее в течении дня температура понижалась и 14.12.2024 в 12 ч ВСВ составила -15°C . 13.12.2024 наблюдался ветер западно-юго-западного направления, скорость ветра была 3 м/с. В течении суток ветер сменился на восточно-юго-восточный и скорость ветра составила 1 м/с.

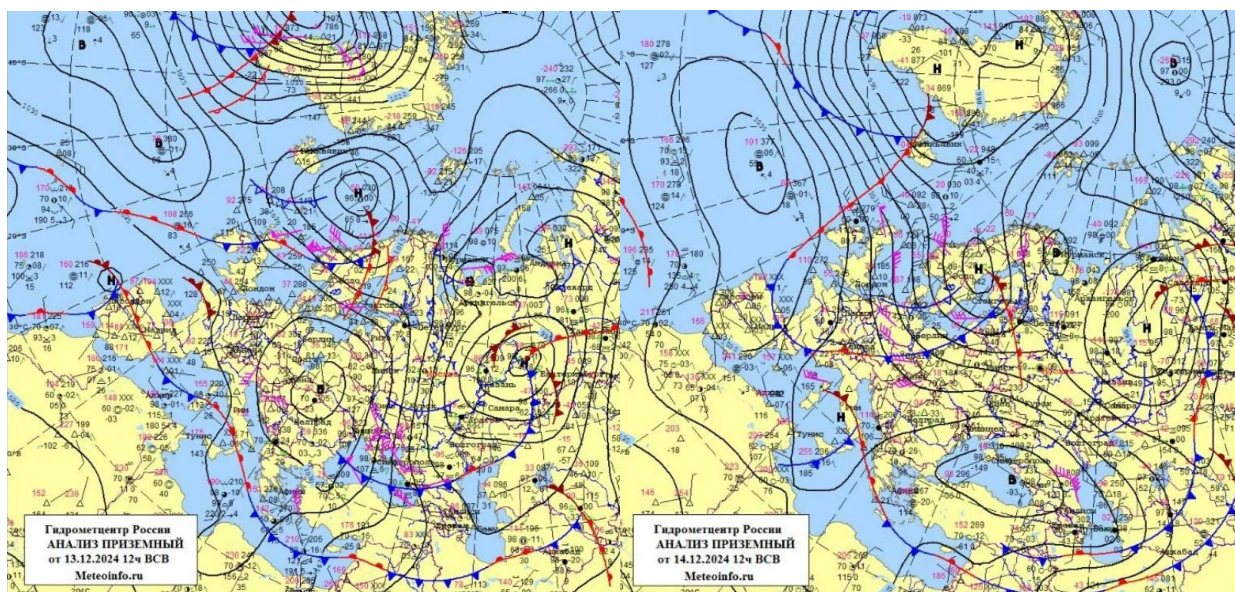


Рисунок 3.14 - Синоптическая ситуация за период с 13.12.2024 по 14.12.2024

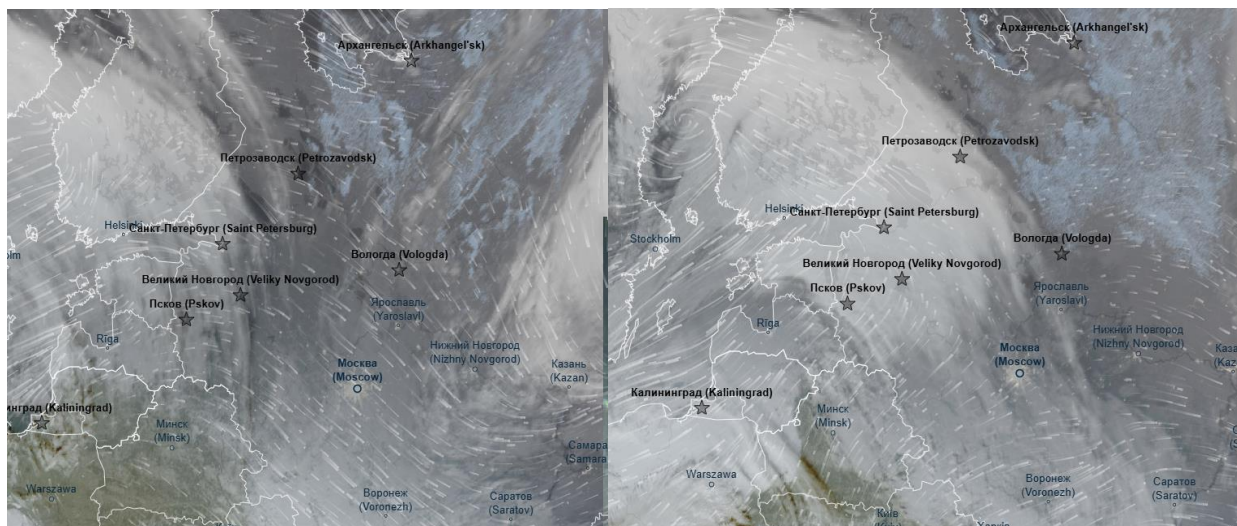


Рисунок 3.15 - Спутниковые снимки за 13.12.24 и 14.12.24 в 12 ч ВСВ

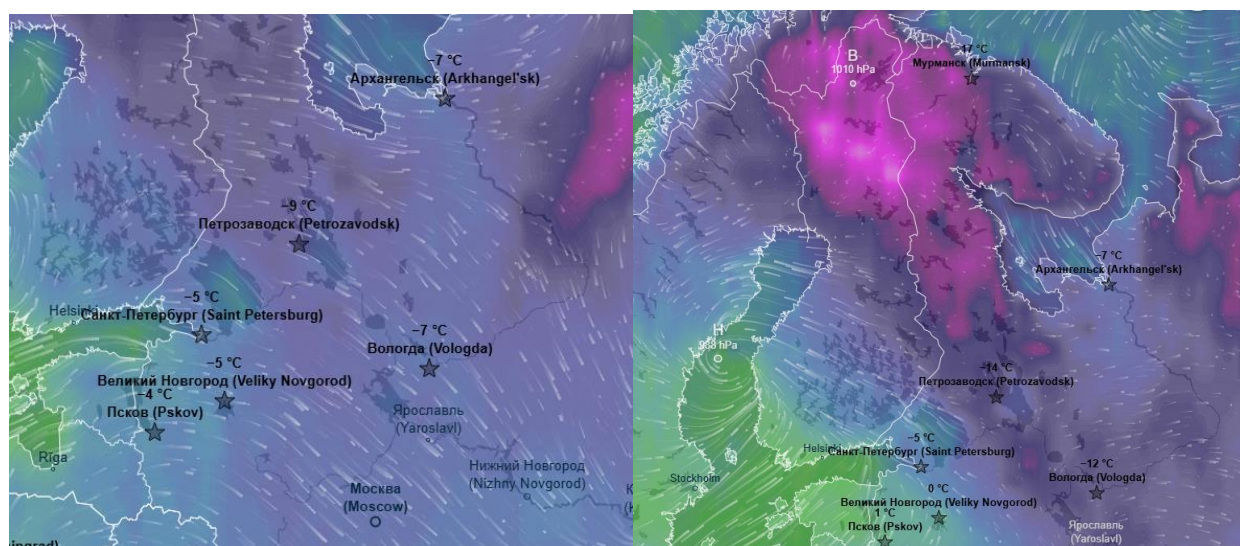


Рисунок 3.16 – Карта поля ветра и температуры за 13.12.24 и 14.12.2024 г 12 ч ВСВ

Таким образом можно предположить, что в данном случае модели предполагали, что циклон, смещающийся с Атлантики достаточно интенсивный, и обладает достаточной силой, чтобы сместить заток холода из Арктики. Но в данной ситуации оказалось, что гребень оказался достаточно интенсивным и заток холода тоже, вследствие чего циклон начал отклоняться к югу. В области гребня наблюдалась безоблачная и безветренная зона, которая протянулась от северной части Норвегии и до Вологды. Вероятно, что Петрозаводск должен был оказаться также под влиянием обширного циклона, смещающегося с Атлантики.

Отсутствие ошибки в Вологде может быть связано с тем, что она находилась под влиянием антициклона, расположенного на юге России.

2. Рассмотрим еще один случай неуспешного прогноза температуры воздуха, который наблюдался 18.12.2024. В данном случае модель ICON ошиблась в Вологде, а модель ПЛАВ в Петрозаводске. Прогноз по модели ICON был занижен, а по модели ПЛАВ завышен, величина ошибки составила $-4,1^{\circ}\text{C}$ и 6°C соответственно.

Рассмотрим развитие синоптической ситуации с 17.12.2024 по 18.12.2024 гг.

17.12.2024 над восточной Европой и Европейской частью России располагалась обширная многоцентровая депрессия. Первый центр находился над о. Новая Земля, давление в нем составляло 984 гПа, за сутки давление увеличилось на 4 гПа, малоподвижный. Второй центр находился в районе Нижнего Новгорода, давление в нем составляло 983 гПа, за сутки циклон углубился на 3 гПа и сместился в юго-восточном направлении. 17.12.2024 над Атлантикой располагался второй циклон, его центр располагался западнее о. Великобритания и давление в нем составляло 987 гПа. В течении суток циклон углубился на 18 гПа и сместился на север-восток образовав обширное барическое образование, с центром восточнее Норвегии.

На севере Скандинавского полуострова начала формироваться барическая седловина, между циклоническими образованиями описанными выше и гребнями антициклонов, которые располагались на юге Европы и в районе восточного побережья Гренландии. Также начал вторгаться гребень Азиатского антициклона. В течении суток седловина сместилась на юго-восток и Кольский полуостров, Финляндия и северная часть области исследования оказалась под ее влиянием.

17.12.2024 Петрозаводск и Вологда находились в тыловой части обширного циклона. 18.12.2024 Петрозаводск располагался в седловине, а на

Вологду оказывала влияние северо-западная периферия циклона. Наблюдалось вторжение холодного арктического воздуха.

17.12.2024 в 12 ч ВСВ температура воздуха в Петрозаводске составила -15°C , а в Вологде -8°C . В ночные часы температура в Петрозаводске и Вологде понизилась и составила -16°C и -13°C соответственно. Далее в течении дня температура в Петрозаводске понизилась и составила -18°C , а в Вологде не изменилась и составила -13°C . В течении суток ветер имел северо-западные направление, скорость ветра составляла 3-4 м/с.

В течении суток в Вологде наблюдалась облачная погода и осадки в виде снега. В Петрозаводске облачная погода и осадки наблюдались днем 17.12.2024 и в ночные часы, к утру 18.12.2024 количество облачности начало уменьшаться и осадки прекратились.

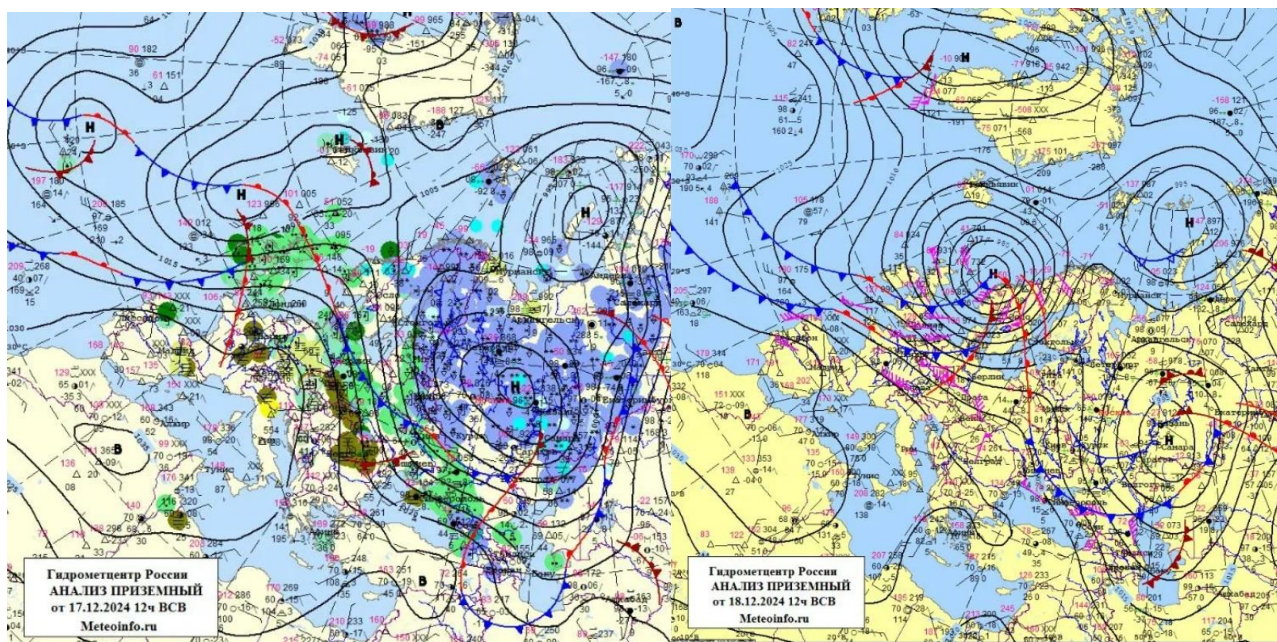


Рисунок 3.17 - Синоптическая ситуация за период с 17.12.24 по 18.12.24

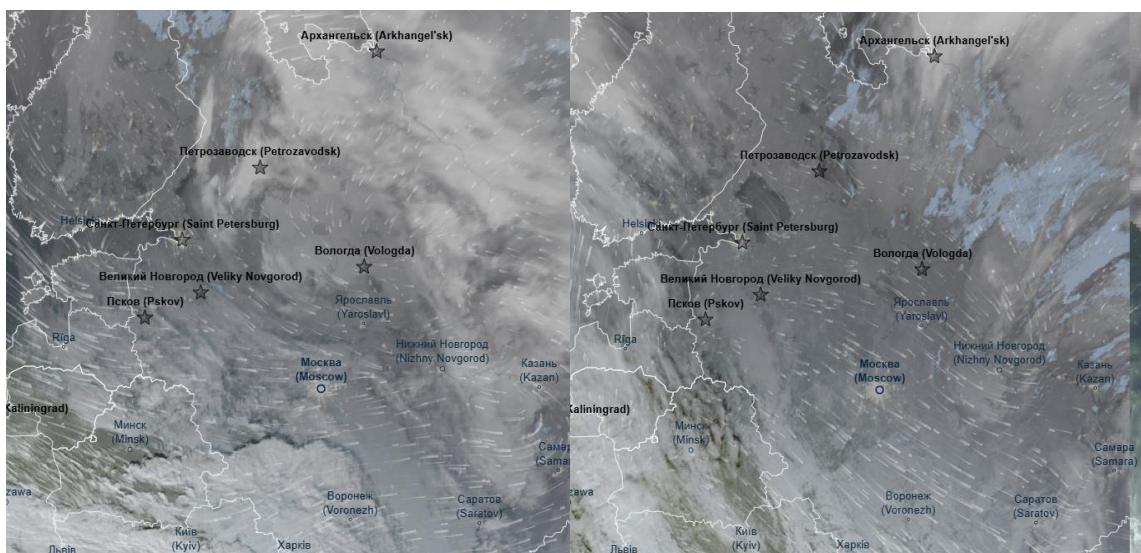


Рисунок 3.18 - Спутниковые снимки за 17.12.24 и 18.12.24 в 12 ч ВСВ

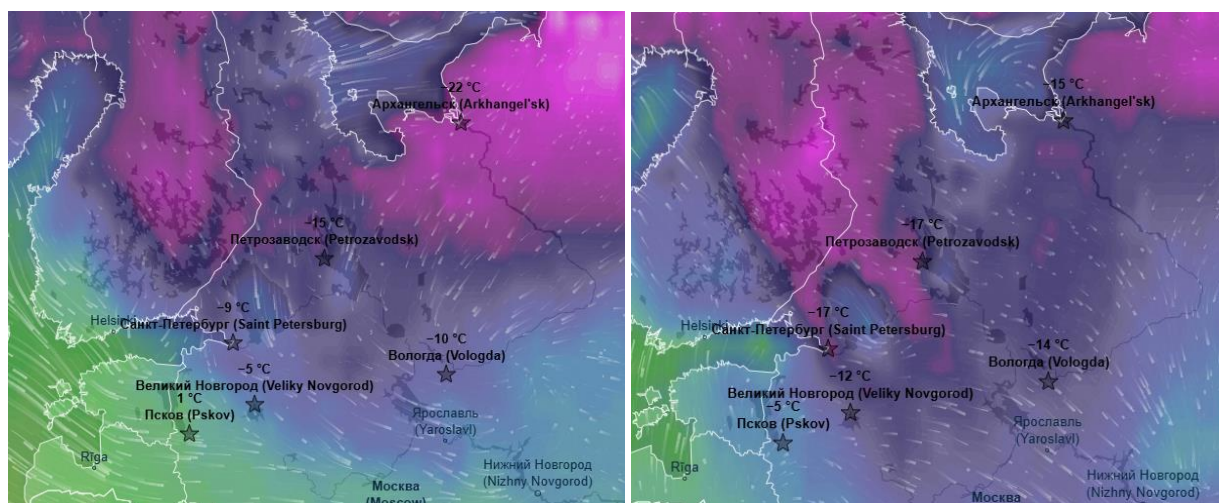


Рисунок 3.19 – Карта поля ветра и температуры за 17.12.24 и 18.12.2024 г 12 ч ВСВ

Таким образом можно предположить, что ошибочный прогноз в Вологде был связан с влиянием циклона. Вероятно, что циклон, располагавшийся над Европейской территорией России, должен был сместиться на восток и следовательно Вологда оказалась бы под влиянием барической седловины. Облачная погода, связанная с влиянием северо-западной периферии циклона, вероятно, не давала воздуху значительно остыть в ночные часы. Также наблюдалась значительная влажность воздуха вследствие выпадения осадков, которая способствовала удержанию тепла. Такие факторы привели к незначительным колебаниям температуры воздуха.

В случае с Петрозаводском в дневные часы наблюдалась облачная погода и осадки, которые прекратились к утру и стала наблюдаться малооблачная погода. Возможно, модель предполагала, что Петрозаводск также как и Вологда окажется под влиянием северо-западной периферии циклона, но в ночные часы наблюдалась переменная облачность, которая способствовала выхолаживанию воздуха. Можно предположить, что в данной синоптической ситуации модель не учла скорость смещения циклона и возникли трудности в расчетах подсеточных процессов.

Рассмотрим также синоптическую ситуацию, когда ошибочных прогнозов не наблюдалось, но регион исследования располагался в области седловины.

Рассмотрим развитие синоптической ситуации с 07.12.2024 по 08.12.2025
07.12.2024 район исследования находился под влиянием северо-западной периферии обширного Азиатского антициклона. Над Европой, Скандинавией и о. Шпицберген располагалась обширная двухцентровая депрессия. Первый центр располагался над Великобританией, давление в нем составляло 982 гПа, в течении суток циклон заполнился на 20 гПа. Второй центр располагался южнее острова Шпицберген и давление в нем составляло 998 гПа. Первый центр смещался в юго-восточном направлении, а второй в восточном. Под влиянием гребня антициклона, расположенного над Атлантикой циклон «разделился» на два отдельных, обособленных центра первый располагался над Шпицбергенем, а второй над Италией. Таким образом над Скандинавией образовалась седловина, которая в течении 12 ч сместилась на юго-восток и область исследования оказалась под ее влиянием.

07.12. 12 ч ВСВ фон температуры воздуха по области исследования от -1°C ... -6°C . В течении суток температура воздуха по области исследования значительно не изменялась. По всем станциям наблюдалась облачная погода, днем 07.12.24, а также в ночные часы выпадали осадки в виде снега. В Пскове наблюдалась также облачная погода, но осадки отсутствовали. 07.12.24 в 12 часов ВСВ наблюдался ветер юго-восточного направления 2-3 м/с. В ночные

часы в Санкт-Петербурге наблюдался штиль, в Великом Новгороде, Пскове и Вологде был ветер восточных направлений 2 м/с, а в Петрозаводске юго-юго-западного направления 2 м/с. Днем 08.12.24 в Санкт-Петербурге, Пскове и Великом Новгороде наблюдался также ветер восточных направлений 1-2 м/с, в Петрозаводске - юго-западный 1 м/с, а в Вологде штиль. Таким образом можно сделать вывод, что в течении суток на территории исследования наблюдался слабый ветер переменных направлений.

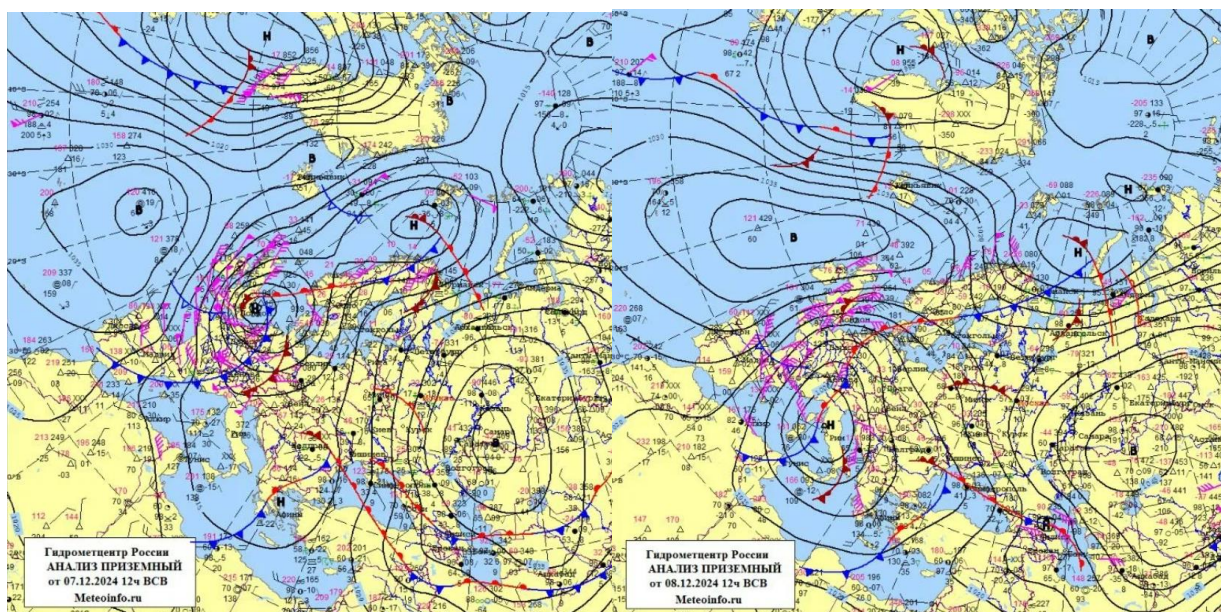


Рисунок 3.17 - Синоптическая ситуация за период с 07.12.2024 по 08.12.2024

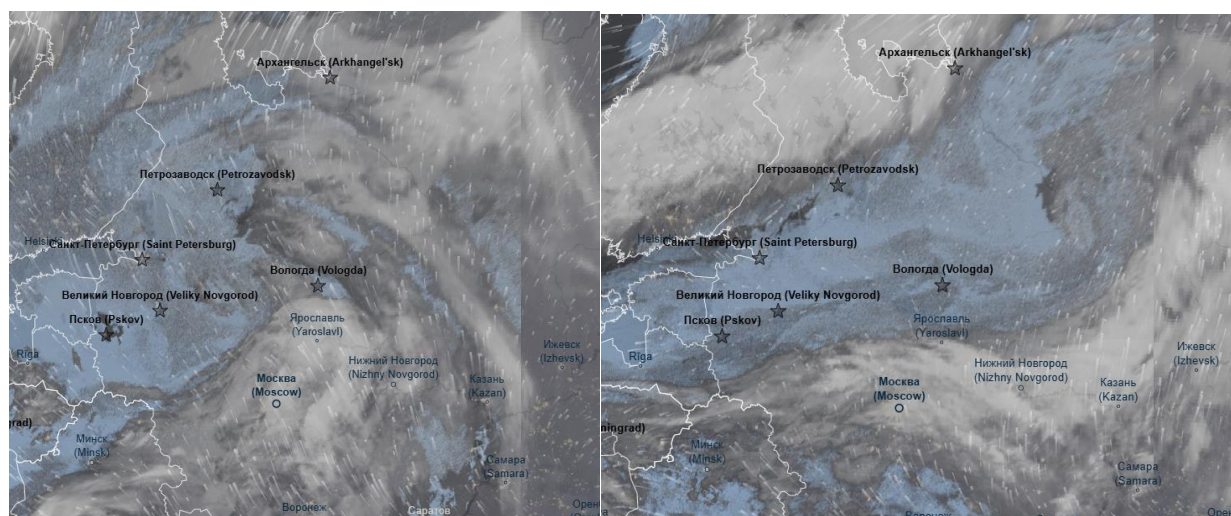


Рисунок 3.21 - Спутниковые снимки за 07.12.24 и 08.12.24 в 12 ч ВСВ

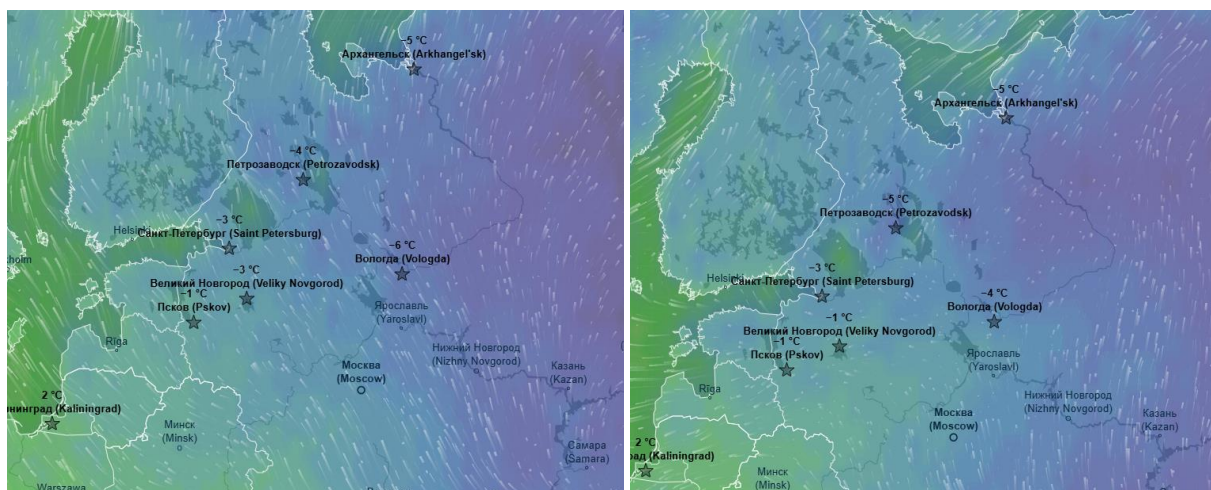


Рисунок 3.22 – Карта поля ветра и температуры за 07.12.24 и 08.12.24 12 ч ВСВ

В отличие от случаев, описанных выше, области высокого давления располагались на востоке и западе, а области низкого давления на севере и юге. Наблюдался ветер южных направлений, отсутствовали вторжения арктического холодного воздуха.

Вероятная причина отсутствия ошибок связана с тем, что модели учли восточное смещение атлантического гребня, также отсутствовали значительные колебания температуры и наблюдалась стабильная погода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе бакалаврской работы были выполнены следующие задачи:

1. Создан архив прогностических данных максимальной температуры воздуха заблаговременностью 24 ч;
2. Рассчитаны и проанализированы критерии успешности прогнозов.
3. Проанализированы синоптические ситуации в дни с ошибочными прогнозами температуры воздуха и выявлены наиболее типовые.

В результате анализа успешности прогнозов максимальной температуры воздуха, полученных с помощью прогностических моделей ICON и ПЛАВ в период с 01.11.2024 по 31.03.2025 гг. на Северо-Западе Европейской территории России можно сделать следующие выводы:

1. Модель ICON допустила почти в три раза меньше ошибочных прогнозов температуры воздуха, чем модель ПЛАВ (22 ошибки и 60 ошибок). Наибольшее количество ошибочных прогнозов температуры воздуха у обеих моделей наблюдается в феврале, а наименьшее в ноябре у модели ICON и в ноябре и декабре у модели ПЛАВ.

2. Наиболее проблемным городом для обеих моделей является Петрозаводск;

3. ICON обеспечивает более высокую точность прогнозов температуры воздуха во всех городах, она в среднем на 0,2-0,4 °С точнее, чем модель ПЛАВ.

4. Обе модели имеет тенденцию занижать прогнозируемую температуру воздуха по отношению к фактическим данным во всех городах;

5. Общая оправдываемость прогнозов для Северо-Запада Европейской территории России по модели ICON составила 97 %, а по модели ПЛАВ 92 %, в целом обе модели показывают хорошие значения общей оправдываемости;

6. Наиболее успешной для данного региона является модель ICON;

Анализ синоптических ситуаций показал, что для неуспешных прогнозов температуры воздуха каждой из моделей характерны малоградиентные поля в них наблюдается больше половины всех ошибочных прогнозов температуры воздуха. Также для неуспешных прогнозов погоды характерны синоптические

ситуации, когда пункты исследования попадают в зону взаимодействия между барическими образованиями высокого и низкого давления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год [Электронный ресурс] - г. Москва: Росгидромет, 2025. - режим доступа:
https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/Доклад%20об%20особенностях%20климата%20на%20территории%20РФ%20за%202024%20год.pdf (дата обращения 01.02.2025)
2. Дронов В.П. География. Россия: природа, население, хозяйство. 9 класс: учеб. для общеобразоват. организаций / В.П. Дронов, Л.Е. Савельева – М.: Просвещение, 2018. – 207 с.
3. Раковская Э.М. Физическая география России: Учеб. для студ. пед. высш. учеб. заведений [В 2 ч.]. Ч.1 Общий обзор. Европейская часть и островная Арктика / Э.М. Раковская, М.И. Давыдова - М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2001. - 288 с.
4. Климат России: монография / под ред. Н.В. Кобышева – СПб.: Гидрометеиздат, 2001. – 654 с
5. Климат Ленинграда / под ред. Ц.А. Швер, Е.В. Алтыкис, Л.С. Евтеева. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. – 254 с.
6. Ventusky.com [Электронный ресурс] - Режим доступа:
<https://www.ventusky.com/>
7. Карты прогноза на 5 суток по результатам глобальной модели ПЛ-АВ Гидрометцентра России и Института вычислительной математики РАН [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/plav-forc-rus1>
8. Зверев А.С. Синоптическая метеорология / А.С. Зверев. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. - 712 с.
9. Численный анализ атмосферных процессов [Электронный ресурс] / А.Г. Светашев, Н.В. Дорожко - Минск, 2021. – режим доступа:

<https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/270693/6/Численный%20анализ%20атмосферных%20процессов.pdf> (дата обращения 01.02.2025)

10. Белов П.Н. Численные методы прогноза погоды / П.Н. Белов, Е.П. Борисенков, Б.Д. Панин - Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. - 376 с.

11. ICON (Icosahedral Nonhydrostatic) Model. [Электронный ресурс]. - Режим доступа:
https://www.dwd.de/EN/research/weatherforecasting/num_modelling/01_num_weather_prediction_modells/icon_description.html (дата обращения 01.02.2025)

12. Толстых М.А. Развитие глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ в 2009–2019 гг. / М.А. Толстых, Р.Ю. Фадеев, В.В. Шашкин [и др] // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019.- № 4. - с. 77-91.

13. Технология среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 с горизонтальным разрешением около 10 км / М.А. Толстых, Р.Ю. Фадеев, В.В. Шашкин [и др]- Москва [Электронный ресурс].- Режим доступа:
<https://method.meteorf.ru/publ/sb/sb51/01.pdf> (дата обращения 01.02.2025)

14. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения: руководящий документ РД 52.27.724–2019. – М.: Гидрометцентр России, 2019. – 62 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа:
<https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/RHM/nast-KPP-2019.pdf> (дата обращения 01.02.2025)

15. Киктев Д.Б. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов / Д.Б. Киктев, А.В. Муравьев, А.Ю. Бундель – М.: Типография АМА ПРЕСС, 2021. – 94 с. [Электронный ресурс]- режим доступа:
https://method.meteorf.ru/norma/document/mr_01_22

16. Синоптические карты [Электронный ресурс] – Режим доступа:
<https://meteoinfo.ru/mapsynop>

Приложение А

Типовые синоптические ситуации, сопутствующие неуспешным прогнозам

	Модель		с-ция	тип поля		величина ошибки
	ICON	ПЛА		за день до 12 UTC	00 UTC	
		В				ПЛАН
01.11.2024		+	Петрозаводск	тыловая часть Zn/ вторичный ХФ	передняя часть гребня/ малоградиентное поле	гребень/ малоградиентное поле
11.11.2024	+	+	Вологда	восточная периферия Az	малоградиентное поле ВД/ центр Az	малоградиентное поле ВД/ центр Az
17.11.2024		+	Санкт-Петербург	ТСЦ/ ОФ	тыловая часть Zn	тыловая часть Zn
27.11.2024		+	Санкт-Петербург	Прохождение ХФ	Образование волн на ХФ	ТСЦ волны
14.12.2024	+	+	Петрозаводск	зона между Zn и Az	Образование волн на ХФ в тыловой части	ТС волны/ облачный фронт
15.12.2024		+	В.Новгород	седловина	Седловина	Седловина
16.12.2024	+		Вологда	седловина с передней части Zn/прохождение ТФ	ТСЦ	ФО
17.12.2024		+	Вологда	Ложбина	ФО	ложбина
18.12.2024	+		Петрозаводск	тыловая часть Zn	центральная часть Zn	центральная часть Zn
24.12.2024		+	Вологда	тыловая часть Zn	тыловая часть Zn	Седловина
03.01.2025		+	Петрозаводск	гребень	гребень	зона между западной периферий Zn и седловиной
06.01.2025		+	Санкт-Петербург	тыловая часть Zn/ облачный фронт	Малоградиентное поле низкого давления/тыловая часть Zn	седловина
10.01.2025		+	Петрозаводск	тыловая часть Zn	гребень	Малоградиентно поле низкого давления
11.01.2025		+	Вологда	седловина	гребень/ облачный фронт	гребень
12.01.2025		+	Петрозаводск	передняя часть Zn	гребень	гребень
13.01.2025	+		Псков	фронт окклюзии	фронт окклюзии	ТСЦ
21.01.2025	+		Петрозаводск	гребень	гребень	гребень
				зона между тыловой частью Zn и гребнем	зона между Zn и Az	зона между Zn и Az
					гребень Az	центральный часть Az/ малоградиентное поле ВД
						3,1
						3,4

Продолжение таблицы									
				ФО/центральная часть Zn	Северная периферия Zn/ малоградиентное поле НД	зона между гребнем и циклоном/Оф			
03.02.2025		+	Петрозаводск	седловина/ ФО	Седловина	Седловина	-3,6		6,5
04.02.2025	+		Петрозаводск	Седловина	Седловина	Седловина	-3,5		
05.02.2025	+		В.Новгород	зона между Zn и Az	ложбина/ ФО	малоградиентное поле ВД			-3,1
06.02.2025		+	Петрозаводск	малоградиентное поле ВД	малоградиентное поле ВД/ центр Az	малоградиентное поле ВД/ центр Az			-3,3
		+	В.Новгород						
07.02.2025	+	+	Санкт-Петербург	малоградиентное поле ВД	малоградиентное поле ВД/ центр Az	малоградиентное поле ВД/ центр Az	-3,9		-3,9
		+	Псков	малоградиентное поле ВД	малоградиентное поле ВД/ центр Az	малоградиентное поле ВД/ центр Az			-3,6
08.02.2025		+	Вологда	малоградиентное поле ВД/ центр Az	малоградиентное поле ВД/ центр Az	малоградиентное поле ВД/ центр Az			3,3
09.02.2025	+	+	Вологда	малоградиентное поле ВД/ центр Az	малоградиентное поле ВД/ центр Az	малоградиентное поле ВД	3,2		3,2
10.02.2025		+	Вологда	малоградиентное поле ВД	малоградиентное поле ВД	малоградиентное поле ВД			3,7
11.02.2025		+	Псков	малоградиентное поле ВД	малоградиентное поле ВД	малоградиентное поле ВД			3,2
12.02.2025	+	+	В.Новгород	малоградиентное поле ВД/Az	зона между Zn и Az	Седловина	5,2	4,2	
	+		Псков	малоградиентное поле ВД/Az	зона между Zn и Az	Седловина	3,7		
18.02.2025		+	Петрозаводск	тыловая часть Zn	передняя часть Zn	ложбина/ Хф			-3,3
19.02.2025		+	Петрозаводск	ложбина/ Хф	тыловая часть ложбины	Ложбина/ малоградиентное поле НД			-3,3
	+	+	Петрозаводск	Ложбина/ малоградиентное поле	зона между Zn и Az/ малоградиентное поле	зона между Zn и Az	-6,3	-4,3	
20.02.2025	+	+	Санкт-Петербург	Зона между ложбиной и Az/ малоградиентное поле	зона между Zn и Az/ малоградиентное поле	зона между Zn и Az	-3,1	-3,1	
	+	+	Псков	Зона между ложбиной и Az/ малоградиентное поле	зона между Zn и Az/ малоградиентное поле	зона между Zn и Az	-3,2	-5,2	
		+	Петрозаводск	зона между Zn и Az	зона между Zn и Az	зона между Zn и Az		-3,4	
21.02.2025		+	Санкт-Петербург	зона между Zn и Az	зона между Zn и Az	зона между Zn и Az			-4,8
23.02.2025	+	+	Псков	северная периферия гребеня	северная периферия гребеня	зона между Zn и Az	-4	-4	
24.02.2025		+	Петрозаводск	зона между Zn и Az	зона между Zn и Az	зона между Zn и Az			-4
		+	Вологда	гребень Az/малоградиентное поле ВД	гребень Az/малоградиентное поле ВД	гребень Az/малоградиентное поле ВД			-3,2
		+	В.Новгород	Малоградиентное поле ВД	Малоградиентное поле ВД	Малоградиентное поле ВД			3,5
25.02.2025		+	Петрозаводск	зона между южной периферией Zn и малоградиентной зоной ВД	зона между южной периферией Zn и малоградиентной зоной ВД	Малоградиентное поле ВД			-7,1
	+	+	Вологда	малоградиентное поле ВД	Малоградиентное поле ВД	Малоградиентное поле ВД	-3,8	-5,8	

Продолжение таблицы									
27.02.2025	+	+	Вологда	малоградиентное поле ВД	малоградиентное поле ВД	малоградиентное поле ВД	зона между малоградиентной полем ВД и ТСП/облачный фронт	4,1	4,1
08.03.2025		+	Псков	гребень	гребень	гребень	передняя часть Zn		-3,1
10.03.2025		+	Санкт-Петербург	тыловая часть Zn/седловина	седловина	седловина	передняя часть Zn		-4,2
11.03.2025		+	Петрозаводск	Малоградиентное поле/ передняя часть Zn	передняя часть Zn	передняя часть Zn	центральная часть Zn/малоградиентное поле НД		3,3
	+	+	Псков	вторичный ТФ/передняя часть Zn	ТСП	ТСП	центральная часть Zn/малоградиентное поле НД	4,1	3,1
12.03.2025		+	В.Новгород	ХФ/центр Zn	малоградиентное поле НД/ ХФ с волнами	малоградиентное поле НД	малоградиентное поле НД		3,6
		+	Вологда	ТСП/ ОФ	малоградиентное поле НД/ ХФ с волнами	малоградиентное поле НД	малоградиентное поле НД		4,5
13.03.2025		+	В.Новгород	малоградиентное поле НД	ложбина	ложбина	ТСП		3,6
		+	Вологда	малоградиентное поле НД	ложбина	ложбина	передняя часть Zn/малоградиентное поле НД		4,4
15.03.2025		+	Петрозаводск	тыловая часть Zn	тыловая часть Zn	тыловая часть Zn	зона между Zn и гребнем		-4,2
		+	Санкт-Петербург	тыловая часть Zn	зона между Zn и гребнем	зона между Zn и гребнем	зона между Zn и гребнем		-3,9
16.03.2025		+	Петрозаводск	зона между Zn и гребнем	зона между Zn и гребнем	ФО	Ложбина/ФО		-3,2
		+	Санкт-Петербург	зона между Zn и гребнем	зона между Zn и гребнем	вторичный ТФ	Ложбина/ФО		-3,6
17.03.2025		+	Петрозаводск	Ложбина/ФО	зона между Zn и Az	зона между Zn и Az	гребень		-3,4
21.03.2025		+	Петрозаводск	С-В периферия Az/зона между Zn и Az	малоградиентное поле НД/ ложбина	малоградиентное поле ВД	малоградиентное поле ВД		-5,4
22.03.2025		+	Петрозаводск	малоградиентное поле ВД	центральная часть Az	центральная часть Az	центральная часть Az		-4,2
23.03.2025	+	+	Санкт-Петербург	центральная часть Az	центральная часть Az	центральная часть Az	малоградиентное поле ВД/ центр Az	-3,1	-3,1
28.03.2025	+		В.Новгород	южная часть Zn/седловина	южная часть Zn/седловина	южная часть Zn/седловина	гребень Az/малоградиентное поле ВД	-3,7	
	+	+	Петрозаводск	зона между Zn и гребнем	зона между Zn и гребнем	зона между Zn и гребнем	западная периферия Az/малоградиентное поле ВД	-3,2	-4,2
30.03.2025		+	Санкт-Петербург	гребень Az	зона между Zn и гребнем	зона между Zn и гребнем	западная периферия Az/малоградиентное поле ВД		-5
		+	Псков	гребень Az	зона между Zn и гребнем	зона между Zn и гребнем	западная периферия Az/малоградиентное поле ВД		-3,3