



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Прогноз замерзания рек с использованием данных ансамблевого
прогноза»

Исполнитель Эзераина Елизавета Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

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

Цепелев Валерий Юрьевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 11 » июня 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

Оглавление

<u>ВВЕДЕНИЕ</u>	3
<u>1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. МЕТОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАМЕРЗАНИЯ РЕК</u>	7
<u>1.1 Методы, применяемые для прогноза замерзания рек</u>	7
<u>1.2 Использование морозодней в прогнозах ледовых явлений</u>	10
<u>1.3 Система ансамблевого прогнозирования</u>	14
<u>1.4 Основные виды прогностической продукции</u>	28
<u>2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ</u>	38
<u>2.1 Характеристика бассейна реки Северная Двина</u>	38
<u>2.2 Особенности гидрологического режима реки Северная Двина</u>	40
<u>3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНСАМБЛЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ СИНОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ</u>	42
<u>3.1 Принцип подбора аналогов циркуляции к текущим макросиноптическим процессам</u> ..	42
<u>3.2 Представление прогнозов по групповому аналогу в терминах ансамблевого прогноза</u>	44
<u>4. МАТЕРИАЛЫ И БАЗЫ ДАННЫХ</u>	46
<u>4.1 Район исследования</u>	46
<u>4.2 Программное обеспечение</u>	46
<u>4.3 База данных</u>	47
<u>4.4 Статистические методы обработки данных</u>	49
<u>АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</u>	54
<u>5.1 Проверка корреляционной связи между фактическими данными и данными реанализа</u>	54
<u>5.2 Средние суммы морозодней</u>	60
<u>5.3 Прогноз замерзания с использованием сумм морозодней по синоптическому методу</u>	63
<u>5.4. Прогноз замерзания с использованием сумм морозодней по ансамблевому методу</u>	79
<u>5.4.1 Прогноз на 2020</u>	80
<u>5.4.2 Прогноз на 2021</u>	88
<u>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</u>	96
<u>Список литературы</u>	101

1. ВВЕДЕНИЕ

Речной лед играет фундаментальную роль в биологических, химических и физических процессах, определяющих пресноводный режим холодных регионов. От эффективности прогнозирования ледового режима крупных рек зависит экономическое благосостояние ближайших районов, а зачастую и безопасность населения. В Российской Федерации, где на большей части крупных рек ежегодно формируется ледостав, прогнозирование состояния льда особенно важно.

Для определения эффективной гидрологической стратегии в осенне-зимний период необходимо своевременное получение информации не только о текущем состоянии водных объектов, поступающей с гидрологических постов, но и информации о будущем состоянии речных бассейнов. Чем выше заблаговременность такой информации, тем эффективнее могут быть приняты меры. Таким образом, для прогнозирования развития гидрологических процессов наиболее перспективны долгосрочные прогнозы.

К числу наиболее важных характеристик осенних ледовых явлений относятся сроки появления постоянного ледостава. В последние годы увеличилась повторяемость теплых сезонов осени и предзимья, а процесс ледообразования часто носит затяжной характер. В таких условиях большое значение имеет прогноз сроков устойчивого появления льда и дат установления ледостава.

Еще совсем недавно задача долгосрочного прогноза решалась только на основе эмпирических методов, которые опираются на анализ данных наблюдений за прошедший период и в той или иной степени являются

прогнозом по аналогу [1]. В них так же используются статистические связи между прогнозируемыми переменными и предикторами, дальние связи, цикличность временных рядов. Быстрый прогресс вычислительной техники и развитие гидродинамического моделирования позволили перейти к решению задач долгосрочного прогноза на основе использования глобальных моделей атмосферы и океана.

Но на современном уровне качество эмпирического и гидродинамического методов пока оказывается близким. Успешность прогнозов по обоим методам во внетропических широтах остается недостаточно высокой [1]. Однако в будущем, преимущество остается на стороне гидродинамического подхода. Эмпирические методы, базирующиеся на ограниченных выборках данных наблюдений, учитывают лишь небольшую часть влияющих факторов. Обнаруженные ими связи оказываются неустойчивыми во времени и непригодны для прогнозирования нестационарных процессов.

Современные гидродинамические модели учитывают значительно большее количество факторов и опираются на физические законы. Они также имеют ограничения, связанные с недостаточным пространственным разрешением модели и неполнотой исходных данных, что приводит к ошибкам моделей и сказывается на качестве прогнозов.

За последние два десятилетия в прогнозировании погоды произошел сдвиг парадигмы в сторону вероятностных прогнозов, которые принимают форму распределения вероятностей относительно будущих погодных величин и событий. Вероятностные прогнозы позволяют принимать оптимальные решения для многих целей, включая управление воздушным движением, маршрутизацию судов, сельское

хозяйство, производство электроэнергии и финансирование погодных рисков.

До начала 1990-х годов большинство прогнозов погоды были детерминированными, что означало, что только один “лучший” прогноз был составлен с помощью численной модели. Появление систем ансамблевого прогнозирования позволяет расширить возможности долгосрочного прогнозирования и частично нивелировать ошибки моделей, связанные с неточностью исходных данных.

Целью данного исследования является определение возможностей системы ансамблевого прогнозирования (САП), для разработки прогнозов дат установления ледостава на водных объектах, на примере реки Северная Двина.

Задачи данного дипломного проекта:

- 1) Сравнить данные реанализа и данные наблюдений с гидрологических постов бассейна реки Северная Двина
- 2) Получить среднее значение накопленных отрицательных температур по данным наблюдений и по данным реанализа
- 3) Высчитать корреляцию дат установления постоянного ледового покрова (ледостава)
- 4) Разработать экспериментальный прогноз замерзания бассейна Северной Двины по данным реанализа с помощью ансамблевых прогнозов
- 5) Представить полученные данные в удобной для интерпретации форме
- 6) Оценить возможности ансамблевого прогнозирования замерзания реки Северная Двина

Актуальность представленного исследования заключается в перспективности САП как метода для разработки долгосрочного прогноза погоды, а также в очевидной необходимости долгосрочного

прогнозирования ледового режима рек. Соответственно проведенное исследование является современным, а его результаты предполагается использовать в оперативной практике.

2. 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. МЕТОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАМЕРЗАНИЯ РЕК

1.1 Методы, применяемые для прогноза замерзания рек

Несмотря на то, что прогнозы ледовых явлений в нашей стране начали систематически выпускаться только в 40-х годах, к настоящему времени в этой области достигнуты определенные успехи. В основе краткосрочных прогнозов ледовых явлений лежит применение не только приближенных физико-статистических зависимостей, но и строгих решений, основанных на использовании уравнения теплового баланса. Долгосрочные прогнозы ледовых явлений базируются на учете закономерностей развития атмосферных процессов и преемственности их изменения, в течении последующего периода времени. Кроме того, широкое применение в последние годы получили статистические методы, в основе которых лежит использование характеристик развития атмосферных процессов над огромными районами северного полушария. В этих методах в качестве объективной оценки характера атмосферных процессов используются коэффициенты разложения метеорологических полей [2]

Большинство методов долгосрочных прогнозов сроков наступления ледовых явлений на водоемах суши, разрабатываемые и используемые в оперативной практике, основаны на зависимости сроков замерзания и вскрытия рек от особенностей развития атмосферных процессов и температурного режима поверхности океанов в переходные сезоны года. Такие особенности могут значительно отличаться для рек

различных климатических зон, в связи с чем разработки прогностических методов носят локальный характер и привязываются к конкретным участкам рек.

За последние десять лет проведены исследования [1], выявившие существенное влияние на процессы замерзания и вскрытия рек теплового состояния океана. Гипотезу о существовании такого влияния пытались реализовать ряд исследователей в прежние годы, однако обычно рассматривалась температура воды только в Северной Атлантике и только в одной ее энергоактивной зоне, а в качестве характеристики атмосферной циркуляции применялись типы циркуляции по Г.Я. Вангенгейму, определяемые с большой долей субъективизма.

В исследованиях последнего десятилетия были привлечены кроме Северной Атлантики также данные по аномалиям температуры поверхности Тихого океана, что позволило разработать более надежные методы прогнозирования сроков наступления ледовых явлений на реках европейской части России [3].

В Северной Атлантике используемое в разработках поле состоит из 48 неравномерно расположенных точек, выбранных океанологами [4], как наилучшим образом, отражающим положение основных энергоактивных областей (ЭАО) и областей наибольшей изменчивости температуры поверхности океана (ТПО). В северо-западной части Тихого океана, где и находятся основные его ЭАО, были взяты 50 точек (узлов сетки), расположенные западнее 175° з.д. и севернее 30° с.ш. [5].

Другая группа предикторов, необходимая для разработки метода долгосрочных прогнозов сроков ледовых явлений, - характеристики атмосферной циркуляции. Наиболее современный и эффективный

способ выявления таких характеристик в наших целях – синоптико-статистический метод – предложен Е. И. Савченковой [6,7] и применен ею при участии Н. Д. Ефремовой и др. к ряду рек, расположенных в различных регионах России.

К положительным качествам метода следует отнести, прежде всего, рассмотрение полей основных метеорологических элементов (полей геопотенциала H_{100} , H_{500} и приземного давления) на всем пространстве Северного полушария. Другим таким качеством является описание значимых полей этих метеозадающих элементов с помощью разложения по естественным ортогональным функциям, позволяющего рассматривать небольшое число главных составляющих таких полей. Наконец, применение пошаговой регрессии обеспечивает объективность и оптимальность выявляемых зависимостей.

Недостатком подхода Е.И.Савченковой был визуальный, качественный способ определения границ значимых полей. Для его преодоления была предложена процедура, основанная на использовании дискриминантного анализа [8]. Она сводится к тому, что для каждого гидрологического района многолетний ряд отклонений от нормы сроков данного ледового явления (ΔD) делится на три группы случаев: близкие к норме ($|\Delta D| < 0,673\sigma$), ранние ($\Delta D < -0,673\sigma$) и поздние ($\Delta D > 0,673\sigma$). Для двух последних групп в каждом узле географической сетки 5° по широте и 10° по долготе определяются средние значения геопотенциала H и их разность $\delta = \Delta H_{п} - \Delta H_{р}$. Приняты значимыми узлы, где каждое выявленное значимое поле подвергается разложению по естественным ортогональным функциям (ЕОФ), а коэффициенты разложения используются в качестве потенциальных предикторов сроков ледовых явлений для рек рассматриваемого гидрологического района. С помощью пошагового регрессионного анализа, как и в

синоптико-статистическом методе, выявляются наиболее значимые из потенциальных предикторов.

Далее проводится регрессионный анализ всех выявленных для данного гидрологического района значимых предикторов как по температуре поверхности океанов, так и по атмосферным полям. В результате получают комплексные уравнения регрессий, которые можно использовать в качестве прогностических для долгосрочного прогноза сроков ледовых явлений.

1.2 Использование морозодней в прогнозах ледовых явлений

Прогноз зимних ледовых явлений (увеличение толщины и количества льда) в первую очередь учитывает два основных фактора: температуру воздуха и ветровой режим. На общий результат накопления льда в определенной точке влияет сумма отрицательных температур воздуха, накопленных со дня перехода температуры воздуха через ноль. До того дня, когда будет предсказана эта характеристика льда (дата появления льда, лед достигает определенной толщины и т.д.). Это значение обычно называют суммой морозодней. При составлении долгосрочных прогнозов ледового покрова обычно используются физические и статистические методы. Для этого среди множества факторов, определяющих сроки или интенсивность наступления конкретного ледяного явления, необходимо выбрать факторы, которые являются основными факторами развития ледяных явлений в данное время и в данном районе. Основными элементами прогнозирования ледовых явлений являются компоненты теплового баланса, климатические характеристики региона и влияние атмосферных процессов. Прежде чем приступить к разработке прогностических методологий, необходимо проанализировать

относительную роль факторов, предшествующих ледовому явлению, с учетом принадлежности к определенным макроциркуляционным периодам, сезонам года и местным условиям.

Процесс прогнозирования ледообразования и ледовых явлений начинается с момента, когда вода достигает температуры кристаллизации льда в результате охлаждения. Это наступает тем скорее, чем больше теплоотдача воды и чем меньше теплонакопление за предшествующий весенне-летний период (определяемое температурой воды). Температура воздушной массы определяется характеристиками макроциркуляции атмосферы и океана, интенсивностью центра действия атмосферы и их взаимным расположением и т.д. При разработке прогнозов осенних ледовых явлений необходимо учитывать эти факторы.

На основе сумм морозодней может быть разработана классификация зим по степени их суровости.

При разработке методов долгосрочного прогнозирования ледовой обстановки рекомендуется учитывать крупномасштабные процессы взаимодействия океана и атмосферы, а также долгосрочные циклические колебания.

Как отмечают прогнозисты, при статистическом подходе к проблеме долгосрочного прогнозирования, нужно использовать простые прогностические зависимости, если они не противоречат физическим представлениям о процессе. Применение большого количества предикторов в уравнении сильно усложняет процесс отслеживания влияния изменчивости каждого из предикторов на результат расчета. Поэтому имеет смысл использовать только 2-3 основных предиктора.

Температура воздуха и воды за различные периоды, давление в характерных точках либо разность давления, характеризующих

направление и интенсивность воздушных переносов обычно используются в качестве характеристик, оказывающих влияние на ледовые процессы. При разработке методов долгосрочного прогнозирования принято придерживаться идеи непрерывности, инерции, сходства и цикличности атмосферных и гидрологических процессов. Например, очень четко прослеживается переход от предзимья к зиме. Меридиональным процессам в январе-феврале, обуславливающим частые вторжения холодного воздуха на европейскую территорию, предшествуют меридиональные процессы в октябре-ноябре. И, напротив, преобладание западной циркуляции в октябре-ноябре влечет за собой преобладание этой же циркуляции в зимние месяцы.

Одним из основных приемов долгосрочных прогнозов является существующая преемственность в развитии метеорологических процессов. Она проявляется в том, что будущее преобразование изучаемого явления подготавливается совокупностью различных факторов, изменяющихся за длительный предшествующий прогнозу период времени. Причём это происходит на очень больших пространствах. При изучении изменчивости данного явления рассматривается история развития процесса с момента его зарождения и устанавливаются закономерности в этом развитии. Эти закономерности создают условия для возможных преобразований явления в будущем. Так как среди возможных преобразований может быть намечено несколько вариантов развития, то из них выбирают наиболее вероятные преобразования, которые затем и используют в прогнозах.

В качестве примера можно привести вероятные преобразования форм атмосферной циркуляции по Вангенгейму и по Гирсу и влияние этих преобразований на ледовитость арктических морей. В своих работах А.

А. Гирс показал, что преемственность синоптических процессов можно применять не только в прогнозах ледовитости и других ледовых явлений, но и в прогнозах колебания уровня и температуры воды в морях.

А. А. Гирс составил также ряд схем. С помощью этих схем можно проследить цепь наиболее вероятных преобразований синоптических процессов при разной заблаговременности при разных ситуациях. Так, например, исходное состояние берется в октябре—ноябре текущего года, а прогнозируемый период относится к июлю—августу следующего года

Кроме того, было разработано несколько планов. С помощью этого плана вы можете отслеживать наиболее вероятные цепочки преобразований синоптических процессов в разное время в разных ситуациях. Например, начальное состояние выполняется в октябре—ноябре текущего года, а прогнозируемый период представляет июль—август следующего года.

Как правило, прогностическая взаимосвязь не учитывает среднюю часть непрерывной цепочки развития процесса, заключенную между прогнозируемым периодом и периодом начального состояния. Чтобы избежать этого, Гирс рассмотрел процесс непрерывного развития и представил его в виде нескольких последовательностей в течение определенного периода времени. Хотя он основан на учете непрерывности синоптического преобразования, этот метод имеет возможность использовать прогноз погоды большой и малой заблаговременности.

В долгосрочные прогнозы учитываются и другие закономерности, в которых прогнозы погоды явно не используются. Эти зависимости

включают в себя выбор различных аналогов, которые, в свою очередь, основаны на выявлении сходств в развитии процесса.

Широкое распространение получила типизация атмосферных и гидрологических процессов и изучение временных рядов наблюдений за различные периоды. Посредством серии наблюдений выявляются основные характеристики и характеристики периодических и непериодических колебаний изучаемого явления, что позволяет экстраполировать выявленные закономерности ряда на будущие периоды.

1.3 Система ансамблевого прогнозирования

Система численного прогноза погоды использует современные численные модели атмосферы и помогает синоптикам в составлении прогнозов погоды. При этом многие модели обеспечивают хорошее представление погодных условий и могут быть использованы для подготовки автоматизированных прогнозов погоды.

Выходные данные модели воспроизводят некоторые метеорологические элементы лучше, чем другие (например, температура поверхности описывается лучше, чем осадки). Однако хорошо известно, что даже прогнозы, основанные на самых лучших моделях, часто оказываются ошибочными. Прогноз погоды осуществляется на основе анализа атмосферных условий. Модель рассчитывает, как будут изменяться и развиваться параметры атмосферы. Теория хаоса означает, что изменения в атмосферных процессах очень чувствительны к незначительным ошибкам в начальных условиях. Небольшие ошибки в анализе могут привести к большим ошибкам в прогнозировании. Поэтому мы не можем делать идеальных прогнозов. Именно по этой причине ансамбли активно

используются для прогнозирования. Система ансамблевого прогноза позволяет оценить неопределенность прогноза погоды. Вместо детерминированных прогнозов модель выполняет расчеты несколько раз с разными начальными условиями. Отдельные решения, составляющие ансамбль, называются членами ансамбля. Различные решения позволяют оценить неопределенность прогнозов. Неопределенность может меняться изо дня в день в зависимости от синоптической ситуации. Эта информация отражена в руководстве по выражению неопределенности в прогнозе. При этом рекомендуется, чтобы информация о неопределенности присутствовала для каждого прогноза, что отражено в Руководящих принципах представления неопределенности прогнозов (PWS-18, WMO/TD-No.1422).

В настоящее время проблема выпуска месячных и сезонных прогнозов стала одной из ключевых проблем деятельности ВМО. Сегодня, к сожалению, уровень успешности существующих прогностических систем на месяц незначительно выше уровня климатических прогнозов.

Например, был проведен сравнительный анализ структуры временных рядов приземной температуры воздуха на основе данных из сгенерированного ретроспективного архива модельных прогнозов ПЛАВ и стационарных наблюдений. В целом получается, что модель воспроизводит сезонные процессы, но недооценивает амплитуду и изменчивость, а также не воспроизводит структуру временных колебаний. Для дальнейшей работы по совершенствованию методов прогнозирования погоды по месяцам и сезонам, полезных для территории умеренных широт и территории Российской Федерации, необходимо разработать комплексный план численных экспериментов для оценки общей и выборочной предсказуемости по месяцам и сезонам.

Система ансамблевого прогноза - это система численного прогноза погоды, которая позволяет оценить неопределенность и наиболее вероятные последствия прогноза погоды. Вместо того, чтобы запускать модель один раз (детерминированное предсказание), расчет выполняется несколько раз с немного отличающимися начальными условиями. В большинстве случаев физика модели также несколько нарушена, и некоторые ансамбли используют более одной модели внутри ансамбля (многомодельный САП) или одну и ту же модель, но комбинация схем физической параметризации (мультифизический САП) отличается. С помощью ряда различных решений в области прогнозирования мы можем оценить неопределенность прогнозирования и то, насколько мы можем быть уверены в детерминированном прогнозировании [9].

Неопределенность в прогнозах погоды может сильно варьироваться из дня в день, в зависимости от синоптической ситуации, и САП предоставляет оценку этих повседневных неопределенностей. Он также часто используется для подготовки вероятностных прогнозов для оценки вероятности конкретного исхода.

Системы ансамблевого прогнозирования используются по следующим причинам:

1. Атмосфера хаотична;
2. Исходные данные не являются точными;
3. Модель является неточной;

Наиболее общим образом поведение системы может быть представлена в виде функции плотности распределения вероятности (ФПР –PDF). В связи с развитием вычислительной техники возникла возможность строить такие ФПР на период прогноза с помощью больших по объему ансамблей прогнозов. Концепция вероятностного прогнозирования

была разработана Эпштейном в 1969 году. Результаты вычислений в численных моделях с неопределенными граничными условиями зависят от распределения вероятностей в фазовом пространстве модели.

Гидродинамические долгосрочные прогнозы погоды, основанные на этих разработках, получили название "Ансамблевого метода".

Практические решения стохастико-динамических уравнений были обнаружены методом Монте-Карло, который включал их аппроксимацию и последовательный расчет моделей жидкости для каждого начального состояния, содержащегося в ансамбле. Дисперсия членов ансамбля указывает на степень неопределенности в прогнозе.

Метод ансамбля позволяет вводить вероятностные термины в детерминированные прогнозы. Когда несколько членов ансамбля поддерживают определенный прогностический сценарий, вероятность этого конкретного сценария максимальна. Конфигурация системы прогнозирования ансамбля показана на рисунке 1.3.1

Результирующее поле прогнозирования среднего значения для ансамбля обеспечивает более точное предсказание, чем предсказание каждого компонента ансамбля в отдельности.

Однако среднее поле ансамбля все еще может улучшить качество прогнозирования до момента перестройки атмосферной циркуляции.

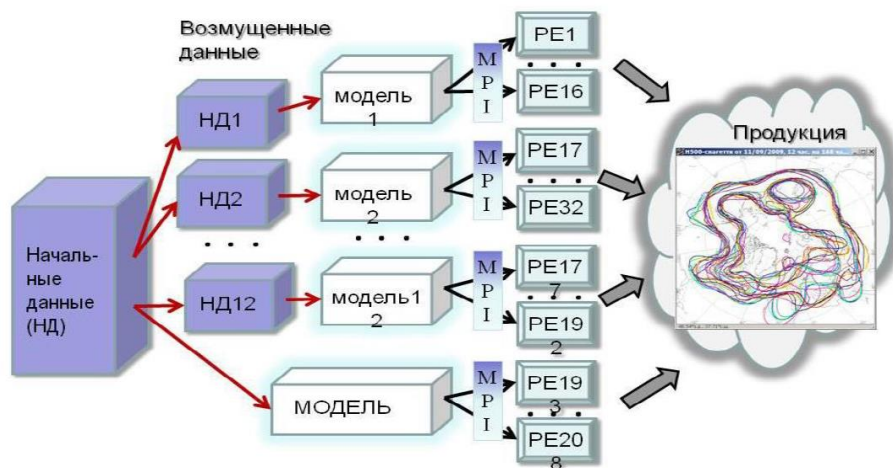


Рисунок 1.3.1 – Конфигурация ансамблевой системы прогноза

Реализация комплексного подхода:

Простейший ансамбль - это набор прогнозов, исходящих из слегка отличающихся (возмущенных) начальных данных (ансамбль начальных данных).

Ансамбль начальных данных должен:

1. Содержать равновероятностные члены;
2. Являться репрезентативной выборкой из вероятных состояний атмосферы;
3. Включать истинное состояние атмосферы (т.е. разброс достаточно велик);
4. Возмущения должны быть в пределах ошибок анализа;

Преимущества использования ансамбля:

1. Разброс ансамблей характеризует качество прогнозов в зависимости от ситуации;
2. Среднее значение по ансамблю обеспечивает лучшую (по сравнению с детерминированными прогнозами) оценку фактического состояния

атмосферы (даже при использовании модели с наихудшим разрешением);

3. Позволяет легко получать вероятностные прогнозы погодных явлений;

В Российской Федерации в Гидрометцентре Российской Федерации имеется система оперативного усвоения данных наблюдений и объективного анализа. В качестве входной информации используются наблюдения, такие как спутники, радары и другие удаленные наблюдения.

Принцип подготовки исходной информации показан на рисунке 1.2.

"Принцип работы" системы:

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

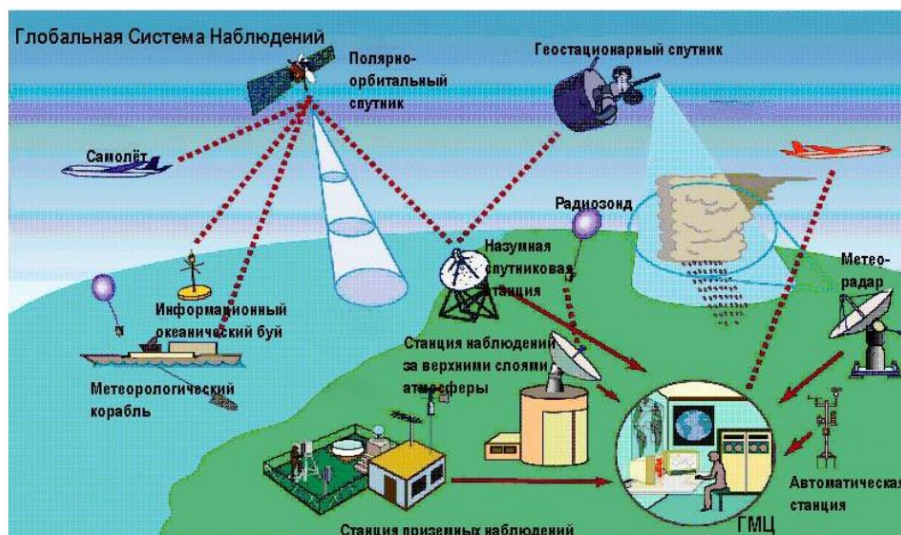


Рисунок 1.3.2 – Технологическая схема ансамблевых прогностических систем

Ансамблевое прогнозирование состоит из нескольких итераций численных моделей прогнозирования погоды.

Объем доступных вычислительных ресурсов не только сокращает количество членов ансамбля, но и накладывает ограничения на то, насколько точной является пространственная и временная дискретизация уравнений в частных производных и насколько модель может быть интегрирована.

За последние 15 лет появилось множество интегрированных систем прогнозирования, временным масштабом начиная от десятилетий (прогнозирование климата) и заканчивая днями краткосрочного прогнозирования погоды. Таким образом, горизонтальное разрешение численных моделей колеблется от нескольких сотен километров для первых, до примерно десяти километров для вторых.

Количество различных прогнозов в ансамбле обычно составляет около 10-100 для обычных систем прогнозирования погоды. Малые пространственные масштабы, как правило, более предсказуемы для более коротких временных масштабов, чем большие пространственные

масштабы. Это может быть использовано в качестве аргумента в пользу предпочтения использования более грубых пространственных разрешений для более длинных диапазонов прогнозирования.

Атмосферные прогнозы во временных масштабах, начиная с порядка недели, зависят от неопределенности эволюции состояния океана. Поэтому для более долгосрочных прогнозов используются связанные модели океан-атмосфера. Ансамбли региональных моделей, которые имеют области интеграции для ограниченной области, требуют представления неопределенности на боковых границах. Ансамбли интеграций глобальных моделей с более грубым разрешением используются для обеспечения динамически согласованных возмущенных боковых граничных условий для региональных модельных ансамблей. Было разработано несколько методов для определения начальной неопределенности комплексных прогнозов погоды.

Это разнообразие возникает из-за наших ограниченных количественных знаний о соответствующих источниках неопределенности и трудности справедливого сравнения различных методов с использованием одних и тех же численных моделей, и фактических данных наблюдений. Хотя мы обсуждаем начальную неопределенность и представление неопределенности модели отдельно, их следует оценивать вместе, поскольку неопределенность модели вносит свой вклад в начальную неопределенность условия. Наилучший способ представления начальной неопределенности не зависит от характера ошибки модели и от того, как она отображается в системе прогнозирования ансамбля.

Для получения ансамбля начальных полей используются различные методы:

1. Метод Монте-Карло (случайное возмущение исходных данных, недостатком является быстрое затухание);
2. Лаговое интегрирование (использование последовательных во времени сроков начальных данных);
3. Бридинг метод – выращивание быстрых мод;

Небольшое случайное возмущение с двумя противоположными знаками добавляется к основному состоянию или в определенный момент анализа. Эта модель интегрируется в возмущенном и невозмущенном состоянии в течение короткого времени. Один прогноз вычитается из другого. Эта разница корректируется в соответствии со стандартом начального возмущения. Возмущения добавляются к анализу следующего члена, и цикл повторяется с самого начала.

4. Сингулярные векторы (в основе идея Лоренца, что динамика малой ошибки подчиняется линейному закону;
5. Стохастическая физика (возможный способ возмущения уравнений модели);
6. Мультимодельный подход;

Концептуально можно различать методы, направленные на получение выборки начальных состояний, и методы, которые выборочно отбирают начальную неопределенность только в тех направлениях пространства состояний, которые динамически являются наиболее важными для определения дисперсии ансамбля.

Методы в первой группе используют методы ассимиляции данных на основе ансамбля для получения выборки начальных состояний. Ансамбль Канадской метеорологической службы основан на начальных условиях ансамбля фильтра Калмана, в котором

ассимилированные наблюдения возмущаются псевдослучайными числами.

Добавленный шум представляет собой ошибку наблюдения. Этот подход можно рассматривать как возможную аппроксимацию расширенного фильтра Калмана. Фильтры с квадратным корнем - это еще один метод, основанный на ансамбле, который направлен на аппроксимацию расширенного фильтра Калмана.

Последние фильтры генерируют возмущения относительно среднего значения ансамбля с помощью детерминированного алгоритма. Ансамбль аналитических возмущений генерируется из ансамбля прогнозируемых возмущений посредством линейного преобразования таким образом, чтобы основанные на ансамбле ковариации удовлетворяли уравнению обновления ковариации фильтра Калмана. Фильтр Калмана с ансамблевым преобразованием представляет собой конкретный фильтр с квадратным корнем. Это очень эффективно в вычислительном отношении, но не позволяет локализовать ковариации на основе ансамбля. Локали- насыщение оценок ковариации используется для фильтрации ложных далекодействующих корреляций, возникающих из-за неопределенности выборки. Следовательно, он подходит только для генерации возмущений, а не для оценки начального состояния.

Методы второй группы направлены на выборку динамически наиболее значимых аспектов начальных неопределенностей. Начальные возмущения динамически ограничены. Методика, которая используется в Национальном центре США для прогнозирования окружающей среды (NCEP) и нескольких других центров основана на так называемых выведенных векторах.

Выведенный вектор получают с помощью следующей процедуры. Случайное возмущение добавляется к исходному состоянию; затем возмущенное и невозмущенное состояния эволюционируют с помощью нелинейной модели прогнозирования в течение периода времени (порядка 6-24 ч); конечная разность эволюционировавших состояний масштабируется таким образом, чтобы ее амплитуда соответствовала амплитуде типичной ошибки анализа. Затем новое возмущение добавляется к новой оценке состояния, и процедура повторяется - выпотрошенный. Выведенный вектор - это возмущение, возникающее после нескольких шагов роста и масштабирования. Масштабирование конечной разности представляет собой влияние ассимиляции данных на начальную неопределенность приближенным способом. Он регулирует амплитуду возмущения, но он не отражает зависящие от масштаба свойства фильтрации алгоритмов ассимиляции данных, которые, как правило, оказывают отбеливающий эффект на распределение ошибок, т.е. ошибки большого пространственного масштаба лучше ограничиваются, чем ошибки малого масштаба. Начальные возмущения для нескольких ансамблей члены получают с помощью нескольких независимых вычислений вектора, которые начинаются с различных случайных возмущений в первом цикле. Метод фильтра Калмана с ансамблевым преобразованием можно рассматривать как усовершенствованный метод селекции - повторное масштабирование заменяется линейным преобразованием.

В реальном мире все источники неопределенности никогда не будут точно определены количественно из-за большого интервала цикличности атмосферы и ограниченного пространственно-временного охвата данных наблюдений. Вклад источника неопределенности в неопределенность прогноза зависит не только от типичной величины ошибок, но и от их пространственных и временных корреляций. Для

спутниковых излучений такие корреляции, вероятно, будут значительными, но количественные оценки пока недоступны.

Корреляции ошибок наблюдения также приведут к неправильным оценкам неопределенности начального состояния, если корреляции не будут учтены в схемах ассимиляции данных.

Представление ошибки модели в методах ассимиляции, основанных на ансамбле, представляет собой еще один важный вызов. Необходимо представить ошибку модели при ассимиляции данных на основе ансамбля, чтобы получить надежные оценки неопределенности.

Идеализированные эксперименты с моделями с различным пространственным разрешением предполагают, что точность методов ассимиляции ансамблевых данных чувствительна к спецификации пространственных корреляций члена ошибки модели. Исследования с мелкомасштабными динамическими системами и с численными моделями прогнозирования погоды также подчеркивают чувствительность дисперсии ансамбля к спецификации временного корреляции члена ошибки модели. Существующие знания о пространственно-временных корреляциях модельной ошибки численных моделей прогнозирования погоды довольно ограничены.

Линейный режим и линейно-касательная аппроксимация. Эволюция возмущений малой амплитуды конкретного решения численной модели прогнозирования погоды может быть приближенно описана путем решения набора линейных уравнений, который получается разложением нелинейной модели Тейлора первого порядка относительно конкретного решения. В дальнейшем мы предполагаем, что дифференциальные уравнения в частных производных, которые управляют динамикой атмосферы, были пространственно

дискретизированы и могут быть записаны в виде системы из N обыкновенных дифференциальных уравнений.

Для кратко- и среднесрочных прогнозов предпочтение отдается методам возмущения начальных данных. На сроках выше среднего упор на возмущение граничных условий и параметров модели.

Ансамблевые системы прогноза могут быть реализованы только на мощной суперкомпьютерной технике. В настоящее время они активно развиваются в различных странах мира, включая Россию.

Результаты интегрирования модели от каждого начального состояния образуют пучок траекторий. Прогноз, составленный на основе среднего или медианного значения ансамбля, обеспечивает в среднем более высокое качество оценок, чем прогноз, рассчитанный от невозмущенного начального состояния атмосферы. Как правило, чем больше размер ансамбля, тем выше качество прогнозов. Для проведения вычислений по большим ансамблям необходимы очень мощные вычислительные средства. В России, прогностические ансамбли пока включают в себя не более 28 членов.

Для оценки модельного климата необходимо иметь длительный ряд прогнозов, относящихся к каждой начальной дате запуска прогноза. Это требует проведения массовых расчетов исторических прогнозов за длительный период (примерно 20 лет и более), что реализуемо только при наличии значительных вычислительных ресурсов, и стало возможным после создания архивов реанализа атмосферы.

Прогностические расчеты подвержены систематическим ошибкам сравнимыми по величине с предсказываемыми аномалиями. Исключение систематических ошибок проводится для конечных прогностических величин при использовании архивов ретроспективных прогнозов. В ходе постпроцессинговых процедур

решается задача регионализации прогноза (downscaling), статистическая интерпретация и др.

Окончательный прогноз ожидаемых значений или аномалий прогностических величин, на основе исправленных средних ансамблевых расчетов может быть представлен в виде карт или таблиц. Прогнозы могут быть представлены в детерминистической и вероятностной формах. Важно анализировать все варианты ансамблевого прогноза. Вероятностный прогноз метеозаэлементов обычно рассчитывается в виде прогностических вероятностей трех градаций (выше нормы, норма, ниже нормы), границы которых определены по климатическому распределению.

Преимущества представления прогнозов в вероятностной форме. Карта, представленная в терминах вероятности, дополнительно позволяет:

1. Расширить сферу применения синоптического долгосрочного прогнозирования, предоставив потребителям стохастическую оценку риска экстремальных событий;
2. Определить области, в которых выдаются прогнозы с высокой или низкой надежностью;
3. Предоставлять возможность принятия обоснованных экономических решений потребителями, для оценки возможности реализации определенных признаков прогностических аномалий погодных параметров для выбранной географической области, в которой выдается прогноз;
4. Изучить различные сценарии макропогоды для прогнозируемых районов;

В 2007-2008 годах в России была внедрена ансамблевая система среднесрочных прогнозов погоды. Система основана на использовании спектральных моделей атмосферы Гидрометцентра России. В состав ансамбля входят 28 участников. В ближайшем будущем мы планируем увеличить размер ансамбля до 32 членов, улучшить разрешение спектральной модели и дальнейшее использование конечно-разностной модели. Каждый экземпляр операции "модель" насчитывает 32 процессорных элемента, и в общей сложности для работы системы требуется 1024 элемента. Системы коллективного прогнозирования могут не только более точно предсказывать состояние атмосферы, но и показывать, где и когда прогнозы заслуживают определенной степени доверия. [10]

1.4 Основные виды прогностической продукции

В данном разделе содержится описание некоторых видов стандартной продукции САП, которая генерируется большинством САП, и краткая информация о том, как ее можно использовать.

Производство основной непосредственной выходной продукции моделей

Целый ряд основных видов продукции производится большинством САП

непосредственно на основе выходных полей моделей. Как правило, к их числу относятся следующие виды продукции.

Средняя величина по ансамблю

Это простое среднее значение параметра между всеми членами ансамбля. Средняя величина по ансамблю обычно лучше обеспечивает проверку оправдываемости, чем контрольный прогноз по наиболее стандартным оценкам оправдываемости (среднеквадратическая ошибка, средняя абсолютная ошибка, коэффициент временной корреляции аномальных значений и т.д.), поскольку она сглаживает непредсказуемые элементы и просто представляет более предсказуемые элементы прогноза. Это может предоставить хороший ориентир на элемент прогноза, который можно спрогнозировать с уверенностью, но которому нельзя доверять как таковому, т. к. он будет редко улавливать риск наступления экстремальных явлений.

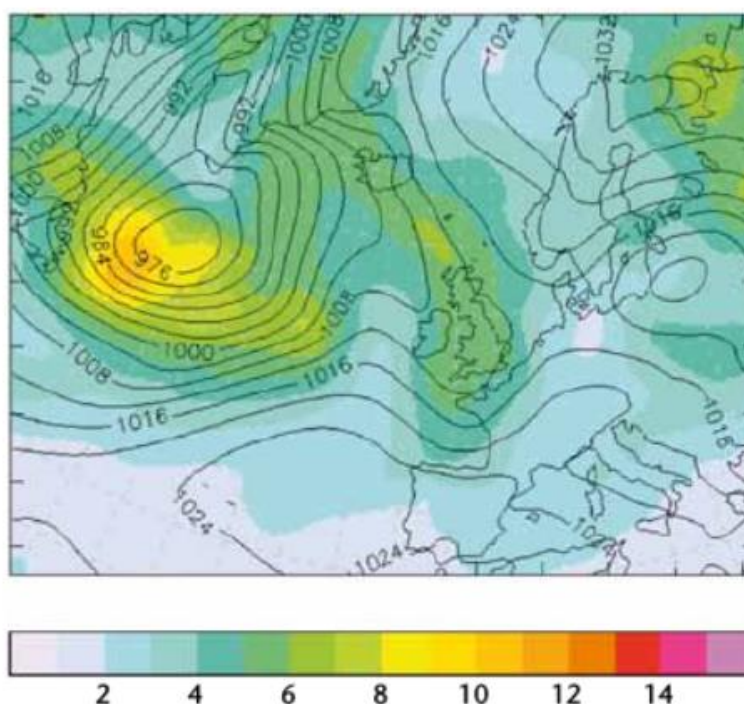
Прогноз среднего значения ансамбля - это простой, но эффективный продукт, поскольку усреднение служит фильтром для уменьшения или удаления атмосферных характеристик, которые различаются между участниками. Среднее значение ансамбля имеет тенденцию ослаблять градиенты; все участники могут прогнозировать интенсивную систему низкого давления со штормовыми ветрами, но в разных положениях, но среднее значение покажет только довольно неглубокую растянутую впадину, создающую впечатление слабых средних ветров. События с высоким воздействием, которые в прогнозе среднего значения ансамбля кажутся слабыми или отсутствуют, можно легко упустить из виду или, в лучшем случае, рассматривать как менее предсказуемые. Среднее значения ансамбля может демонстрировать только слабую особенность, но это не означает, что ни у одного члена нет заслуживающего внимания развития или что более высокие результаты развития сами по себе менее вероятны, поскольку все эволюции, показанные членами ансамбля, одинаково вероятны. Поэтому проверка

почтовых марок и /или использование вероятностей имеет важное значение в сочетании с проверкой среднего значения ансамбля.

Среднее значение ансамбля больше всего подходит для таких параметров, как температура и давление, которые обычно имеют довольно симметричное гауссово распределение в каждой точке. Среднее значение ансамбля менее подходит для скоростей ветра и осадков, поскольку они демонстрируют искаженное распределение, и для этих параметров медиана ансамбля может быть более полезной. Медиана ансамбля определяется как значение среднего члена ансамбля, в котором члены были ранжированы по значению.

Разброс по ансамблю

Рассчитывается как (несмещенное) стандартное отклонение выходной переменной модели и обеспечивает меру уровня неопределенности параметра в прогнозе. Часто указывается на картах с наложением средней величины по ансамблю.



Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

Рис. 1.4.1 – Средние величины (контуры черного цвета) и разброс (заливка разного цвета) для прогноза давления, приведенного к СУМ (на 72 часа)

На рисунке 1.4.1 контурами черного цвета показаны величины среднего давления по ансамблю, приведенные к среднему уровню моря (ДСУМ), а заливкой разного цвета – разброс ДСУМ. Районы, выделенные резкими цветами, указывают на больший разброс и, следовательно, более низкую предсказуемость.

Базовая вероятность

Вероятность часто оценивается как простое соотношение членов ансамбля, которые прогнозируют наступление события в конкретном месте или точке сетки, например, температуру (на уровне 2 м) ниже 0° по Цельсию или более чем одно стандартное отклонение ниже нормы. На рисунке 2 заливкой разного цвета показана вероятность порывов ветра более 40 узлов. Среднее по ансамблю давление, приведенное к СУМ, также включено в виде контуров серого цвета.

Следует отметить, что данное определение вероятности не является истинной байесовской вероятностью, как было бы определено специалистом по статистике, но оно обеспечивает полезную оценку для практических целей. Оно содержит предположение, что модель точно отражает климатическое распределение наступления события. Вероятностные прогнозы, подготовленные таким образом, должны всегда проверяться на больших выборках случаев, чтобы определить степень, с которой прогностические вероятности соотносятся с наблюдаемой частотой.

Пример, приведенный на рисунках 1.4.2 и 1.4.3, был подготовлен для проекта в южной части Тихого океана в рамках более крупного ПППСП.

Определение вероятности наступления события является наиболее последовательным способом передачи информации о неопределенности прогноза. Событие может быть общим или специфичным для пользователя в отношении превышения порогового значения события. Пороговое значение события может соответствовать точке, в которой пользователь должен предпринять некоторые действия для уменьшения потенциального ущерба от значительного погодного явления. Вероятности могут быть: мгновенными (например, вероятность того, что скорость ветра превысит 20 м/с в данный момент времени), рассчитываться за определенный интервал времени (например, вероятность выпадения осадков превышает 50 мм в течение определенного 12-часового периода). Это возможно потому, что сами значения изначально вычисляются как значения, накопленные за некоторый (более короткий) интервал времени.

Вероятности экстремальных порывов ветра вычисляются как вероятности в течение 24 часов, поскольку считается более важным знать, что может произойти экстремальный порыв ветра, чем знать точное время.

Квантили

Набор квантилей распределения ансамбля может обеспечить краткое описание неопределенности. Обычно используются максимальные и минимальные квантили

Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

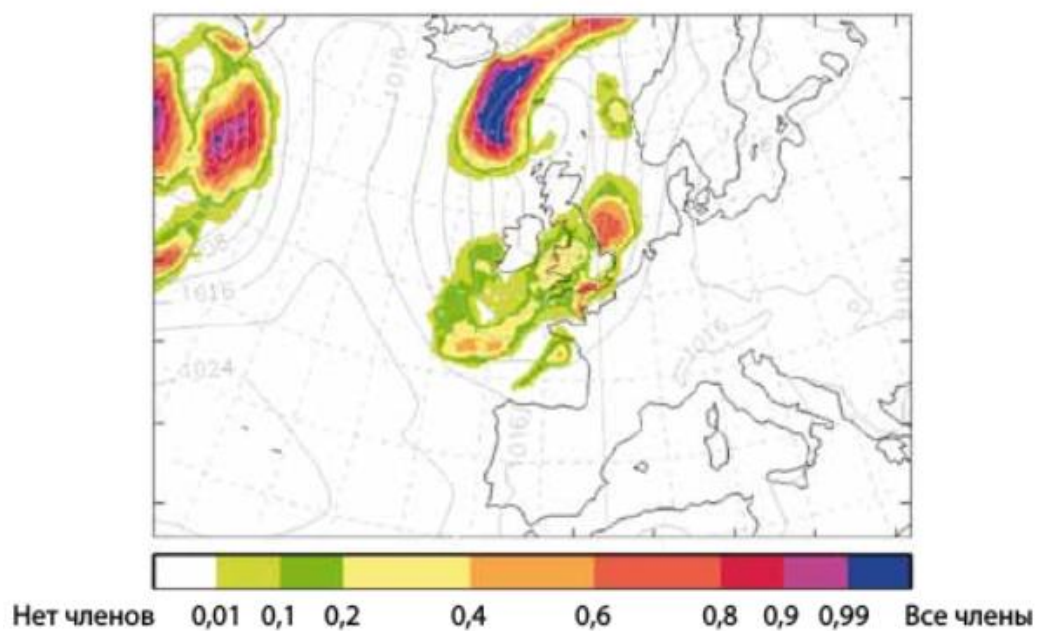


Рис. 1.4.2 – Карта вероятности порывов ветра более 40 узлов по данным региональной системы MOGREPS на 16 июля 2010 г. в 3 МСВ (на 21 час от 15 июля 2010 г. в 6 МСВ); среднее по ансамблю давление, приведенное к СУМ, нанесено как слабый фон

Источник: Метеорологическое бюро СК, © British Crown Copyright

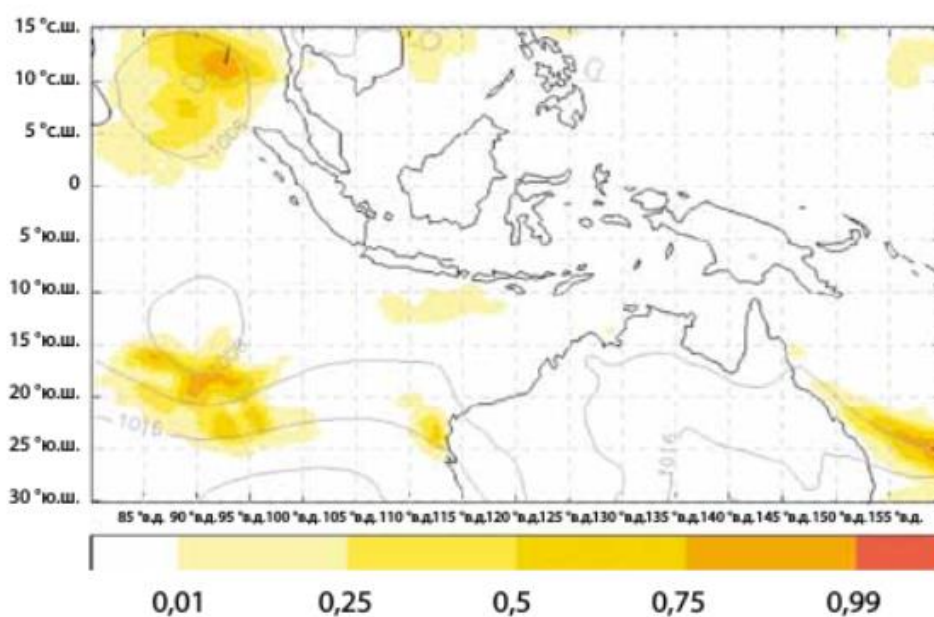


Рис. 1.4.3 – Карта вероятности скорости ветра более 20 узлов на уровне 10 м по данным глобальной системы MOGREPS на 5 ноября 2010 г. в 0 MCB (на 48 часов от 3 ноября 2010 г. в 0 MCB); среднее по ансамблю давление, приведенное к СУМ, нанесено как слабый фон распределения ансамбля, а также 25-й, 50-й (медиана) и 75-й процентиля. Среди других часто используются 5-й, 10-й, 90-й и 95-й процентиля.

Карты-спагетти

Карты, показывающие несколько выбранных контуров переменных (например, контуры 528, 546 и 564 Дм высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа) из всех членов ансамбля, могут дать полезное изображение предсказуемости поля. Там, где все контуры членов ансамбля расположены близко друг к другу, предсказуемость выше; там, где они выглядят как спагетти на тарелке, предсказуемость ниже (см. рисунок 1.4.4).

Изолинии, нарисованные для каждого элемента, очень плотно расположены для прогнозов в короткие сроки, но они становятся все более разбросанными по мере увеличения заблаговременности прогноза, отражая увеличение неопределенности прогноза. Диаграммы спагетти чувствительны к градиентам; в областях со слабым градиентом они могут показывать большой разброс изолиний, даже если ситуация очень предсказуема. И наоборот, в областях с сильным уклоном они могут отображать небольшой разброс изолиний, даже если есть важные отклонения в прогнозе.

Карты-почтовые марки

Набор небольших карт, показывающих контурные диаграммы отдельно взятого члена каждого ансамбля (см. рисунок 1.4.5), позволяет прогнозисту рассматривать сценарии в прогнозе каждого члена и

оценивать возможные риски экстремальных явлений. Однако это большой объем информации, который, возможно, будет трудно усвоить.

Базовые продукты отображают только необработанные данные прогноза без каких-либо особых изменений или последующей обработки. Индивидуально построенные прогнозные диаграммы для всех членов ансамбля, могут отображаться по отдельности, но для удобства визуального сравнения отображаются вместе как "Почтовые марки" (или "Карты или диаграммы почтовых марок"). Они охватывают ограниченную область земного шара, обычно Европу и восточную часть Северной Атлантики. Диаграммы предназначены для использования в справочных целях - например, для объяснения распространения в синоптических терминах и, в частности, причин экстремальных погодных условий и т.д.

Метеограммы для конкретных мест

Выходные переменные модели можно брать из сетки для конкретных мест. Существует множество презентаций, которые могут использоваться для представления прогноза на местах, например, графики шлейфа и вероятности осадков. Одним из наиболее часто используемых средств является метеограмма ансамбля (или САП-грамма), которая использует диаграмму вида «ящик с усами» для иллюстрации основных процентильных пунктов прогностического распределения

Источник: Метеорологическое бюро СК с использованием данных ЕЦСПП, © British Crown Copyright

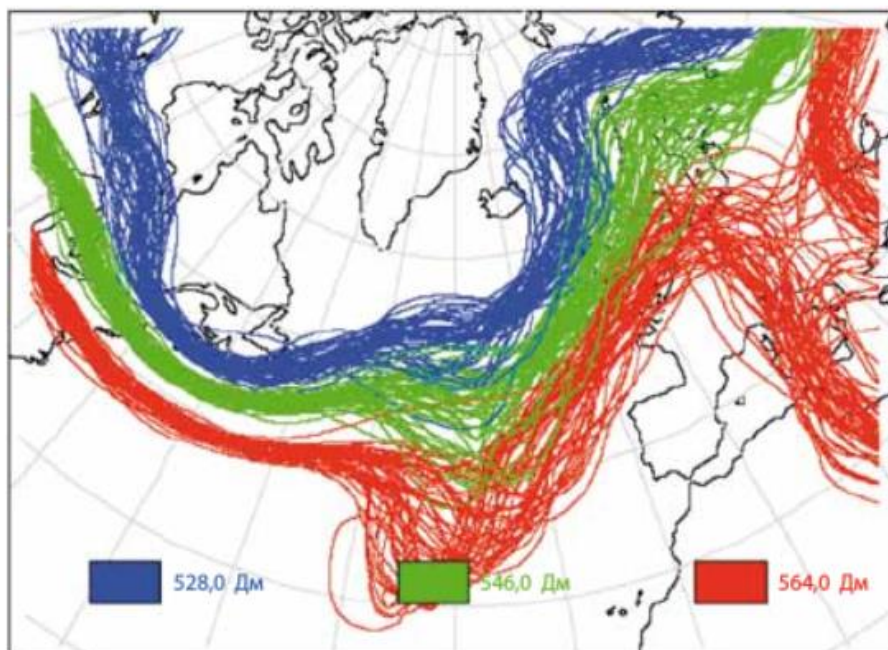
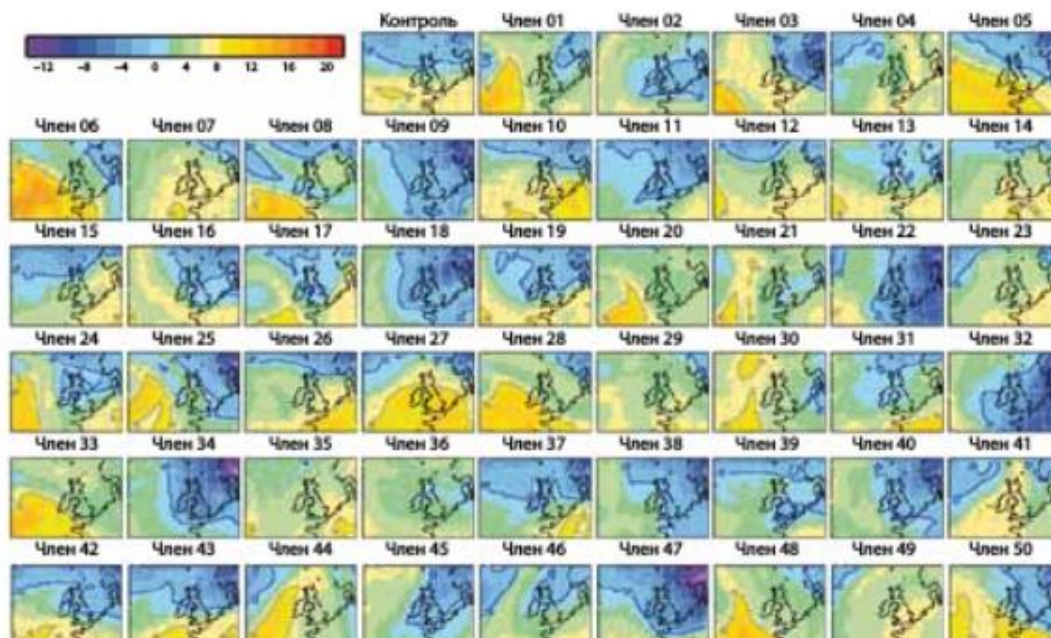


Рис. 1.4.4 – Графики-спагетти ансамблевого прогноза высоты геопотенциала на уровне 500 гПа на 11 февраля 2001 г. в 12 МСВ (на 96 часов от 7 февраля 2001 г. В 12 МСВ)



Источник: Метеорологическое бюро СК с использованием данных ЕЦСПП, © British Crown Copyright

Рис. 1.4.5 – Карта-почтовая марка на 7 февраля 2009 г. в 12 МСВ (потенциальная температура по мокрому термометру на уровне 850 гПа, в градусах Цельсия; на 300 часов от 26 января в 0 МСВ) [9]

3. 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Характеристика бассейна реки Северная Двина

Северная Двина является крупнейшей рекой Европейского Севера России и берет свое начало от слияния рек Сухоны и Юга. Принадлежит бассейну Северного Ледовитого океана.

Протяженность реки от ее истока до впадения в Двинский залив Белого моря составляет 750 километров. Если посчитать длину реки от истока реки Сухоны, то она будет равна 1312 км, а от истока самого длинного правого притока, реки Вычегда – 1810 км. Бассейн реки расположен между 58,5 и 65° северной широты и 38,5 и 56,5° восточной долготы. Водораздел занимает площадь в 357 000 квадратных километров. По размерам бассейна Северная Двина находится на пятом месте среди рек Европейской части России. Бассейн реки представляет собой протяженную, лесистую, слегка холмистую равнину, приподнятую по периметру и углубляющуюся к северо-западу. Почвенный слой бассейна покрыт ледниковыми отложениями, под которыми находятся песчаник, аргиллит и известняк. Заселенность территории бассейна колеблется от 80% до 85% по всей ее территории. Значительную площадь бассейна (около 8,5%) занимают болота, преимущественно, моховые. На сток реки Северная Двина (110 квадратных километров в год) приходится примерно треть общего речного стока в Баренцево и Белое моря. Территория бассейна Северной Двины расположена в подзоне хвойных лесов, где преобладают хвойные деревья (ель и

сосна), смешанные с мелколиственными породами. Значительное пространство в бассейне реки занимают луга со смешанной травой и крупнозлаковой растительностью, растущей преимущественно в поймах. Леса на берегах Северной Двины богаты белыми грибами и ягодами: голубикой, клюквой, красной смородиной и черной смородиной (в пойме реки). Побережье Северной Двины в основном песчаное, внешне похожее на берега реки Волги. У истока Северной Двины много песчаных отмелей, которые каждый год меняют свое местоположение, таким образом, в верхней части реки насчитывается более 20 отмелей. Северная Двина судоходна от самого истока; она протекает через леса и болота и вскоре значительно расширяется. Уже под Красноборском это крупная широкая река, далее по течению получающая дополнительные водные ресурсы от притоков Вагу, Емцу, Сиу, Пинеги и некоторых других, в результате чего ее берега расширяются и размываются. Затем, происходит смена почвы с рыхлой на более плотную, из-за чего река разделяется на множество рукавов и те, в свою очередь, впадают в море. Гидрологическая сеть бассейна хорошо развита за счет сети озер. Количество всех озер в водосборном бассейне составляет 17 602, общей площадью 1517 квадратных километров. Здесь насчитывается 61 879 рек и ручьев общей протяженностью 206 248 километров. Основными притоками являются: Сухона, Юг, Вычегда, Вага, Пинега.

Северная Двина представляет собой типичную равнинную реку с ровным продольным профилем, относительно небольшим уклоном (средний уклон составляет около 0,07%), широкой долиной и поймой протяженностью 10 километров и более. Весной пойма реки затопляется. Извилистое русло реки изобилует островами, отложениями и песчаными отмелями, что затрудняет навигацию. В дополнение ко множеству постоянных островов, на Двине каждый год

образуются новые острова, которые затем размываются и заменяются другими. Большинство из этих островов имеют вид открытых песчаных отмелей, лишь изредка занятых полями. В дополнение к передвижным мелям существуют постоянные отмели. Хотя иногда они углубляются, потом они вновь пополняются новыми песчаными пластами. Течение Двины не быстрое. Большой частью фарватер находится в середине реки. Река Северная Двина протекает в зоне умеренного климата и характеризуется холодной зимой и умеренно теплым летом. Климатические условия водораздела определяют гидрологические условия реки, которые характеризуются долгой и холодной зимой, коротким и прохладным летом и большим количеством осадков. Среднегодовое количество осадков в бассейне составляет около 500 мм, из которых от 60% до 70% приходится на теплую половину года. Бассейн реки Северная Двина подвержен влиянию влажных воздушных масс с запада и относится к зоне избыточного увлажнения.

2.2 Особенности гидрологического режима реки Северная Двина

Гидрологическая система реки Северная Двина характеризуется высокими весенними паводками, относительно низкой летней меженью с дождевыми паводками и низкими зимними уровнями воды. Основное питание реки бассейна получают из таяния снега, накопленного зимой. Из-за накопления осадков в виде снега в течение долгой зимы и интенсивного весеннего таяния паводковый сток весной достигает 50% годового стока воды, от 10% до 20% летом, около 20% осенью и от 5% до 10% зимой. В маловодные годы доля весеннего стока может снизиться с 30% до 40%, а в многоводные годы она может увеличиться с 60% до 80%. Максимальный расход составляет 30700 м³/с в мае и июне. Река замерзает с конца октября по начало ноября и вскрытие

происходит с начала апреля по начало мая. Ледоход бурный, часто сопровождается заторами. Направление, в котором река течет - с юга на север, играет жизненно важную роль в формировании гидрологической системы Северной Двины. Это особенно очевидно в весенне-осенний период, при вскрытии и замерзании реки.

Сумма отрицательных температур воздуха является как показателем суровости зимы, так и основным предиктором в расчетах нарастания толщины льда. [11]

Выявлены тенденции изменения ледового режима рек севера ЕТР в последние два десятилетия: смягчение климатических условий осенью приводит к низким уровням воды в период появления льда, увеличению продолжительности осеннего ледохода и шугохода, позднему замерзанию при высоких уровнях воды. Более длительные оттепели в зимний период, с одной стороны, приводят к зимним вскрытиям, которые нередко из-за высокой водности рек сопровождаются катастрофическими заторами, увеличивается зашугованность русла и заторошенность льда. С другой стороны, длительные оттепели приводят к сокращению толщины льда и уменьшению снегозапасов. В этом случае весенние заторы характеризуются уровнями воды заведомо ниже критических отметок и, при отсутствии похолоданий в период вскрытия, легко разрушаются из-за низкой прочности и малой толщины льда. [12]

4. 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНСАМБЛЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ СИНОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

3.1 Принцип подбора аналогов циркуляции к текущим макросиноптическим процессам

Принцип подбора аналогов (гомологов) циркуляции к текущим макросиноптическим процессам является основным приемом разработки прогнозов в синоптических методах долгосрочного прогноза погоды. При этом подбирается целая группа макроциркуляционных процессов схожих с исходным по пространственному распределению крупномасштабных полей аномалий приземной температуры воздуха, атмосферного давления, температуры поверхности океана, высот барических поверхностей и индексам циркуляции.

Поиск лет-гомологов по методу Вангенгейма-Гирса, предполагает анализ крупномасштабных полей аномалий приземного давления и температуры Северного полушария для пяти месяцев, предшествующих прогностическому. Метод базируется на анализе эволюции общей циркуляции атмосферы в предшествующий прогнозу период времени. Главная идея метода заключается в том, что макросиноптические процессы Северного полушария, приводящие к формированию крупных аномалий погоды одного знака над ограниченным районом полушария, имеют сходный характер развития в течение длительного промежутка времени. В качестве рабочей гипотезы для разработки метода использовалось наличие причинно-следственной связи между формированием аномалий макропогоды в

конкретном районе и особенностями преобразования макроциркуляционных синоптических процессов Северного полушария в четырех месяцах, предшествующих прогностическому месяцу, то есть учитывалась роль ближайшей истории развития макропроцессов.

Основным приемом, используемым для выделения прогностических связей, являлась генетическая классификация макропроцессов, которая заключается в объединении в группы нескольких макросиноптических процессов со сходным характером циркуляционных преобразований на пространстве Северного полушария в течение пяти месяцев, при этом пятый месяц рассматривается как прогностический. Макросиноптические процессы всех лет, входящих в одну группу, формируют типовой макросиноптический процесс (ТМП).

Выделенные, в процессе классификации, ТМП различаются между собой не только по средним месячным характеристикам в прогностическом месяце, но и по специфике преобразования макроциркуляционных процессов внутри прогностического месяца.

Типовые макропроцессы были получены заранее, в результате объективной классификации всех макропроцессов за имеющийся период наблюдений, и представляют собой средние поля из макропроцессов, отнесенных к одному классу. В результате анализа отбирается группа лет-гомологов, имеющих максимальную степень сходства с текущим процессом. Среднее поле по этой группе и является результирующим прогнозом. Таким образом, прогноз формируется из группы нескольких макропроцессов, аналогичных с текущим, для которой был введен термин «групповой аналог».

С целью вероятностного представления прогноза, предлагается перейти к «групповому аналогу». Для этого в качестве прогноза по этому методу необходимо использовать не только лучший аналог/гомолог, но и весь набор выявленных аналогов/гомологов, с учетом степени их сходства к текущему макропроцессу. При использовании такого подхода прогноз можно формулировать как в детерминистической, так и вероятностной форме.

Групповой аналог можно рассматривать как осредненный результат множественного расчета «природной модели» с отличающимися краевыми условиями. Подход, основанный на незначительном изменении начальных условий для расчета циркуляционных характеристик прогностического месяца, используется для генерации множества членов ансамбля гидродинамической модели. Исходя из сходства методологии получения группового аналога и множества членов прогностического ансамбля гидродинамической модели, прогноз по групповому аналогу можно рассматривать как реализацию ансамблевого прогноза, полученную по «природной модели». Прогнозы по синоптическому методу группового аналога можно так же формировать в терминах вероятности, как и ансамблевые прогнозы.

Поскольку каждый из макропроцессов, входящих в прогностическую выборку, является равновероятным членом прогностического ансамбля, то стало возможно получить вероятностные характеристики данного ансамбля и построить соответствующие карты из перечисленного выше списка.

3.2 Представление прогнозов по групповому аналогу в терминах ансамблевого прогноза

Долгосрочный прогноз, представленный в терминах вероятности предполагает разработку значительно большей номенклатуры прогностических карт [12]. В расширенную номенклатуру карт ансамблевого подхода входят карты прогностических аномалий приземного давления, приземной температуры, осадков и изобарической высоты АТ-500 ледующих видов:

- 1) Карты средних по ансамблю (групповому аналогу);
- 2) Индивидуальные карты для каждого члена ансамбля;
- 3) Карты среднеквадратического отклонения по ансамблю;
- 4) Карты вероятности осуществления знака прогностической аномалии в ансамбле;
- 5) Карты осевой изогипсы высотной фронтальной зоны для всех членов ансамбля (карты спагетти);
- 6) Карты вероятности осуществления экстремальных значений метеопараметра в ансамбле.

Исходя из предположения о сходстве физического смысла, заложенного в

прогностическом ансамбле и групповом аналоге, становится возможным существенно расширить список прогностической продукции и для прогнозов, использующих принцип «группового аналога». Поскольку каждый из макропроцессов, входящих в прогностическую выборку, является равновероятным членом прогностического ансамбля, то стало возможно получить вероятностные характеристики данного ансамбля и построить соответствующие карты из перечисленного выше списка. Ассортимент прогностической продукции для группового аналога будет ограничен только тем, что прогнозы по синоптическим методам относятся, в основном, к приземным метеорологическим характеристикам.

5. 4.МАТЕРИАЛЫ И БАЗЫ ДАННЫХ

4.1 Район исследования

Для исследования была выбрана территория бассейна реки Северная Двина. Она является достаточно крупной рекой, и ежегодно покрывается льдом. Также, на ней располагается большое количество гидрологических постов (количество), что делает ее ледовый режим удобным объектом исследования.

В связи с высокой протяженностью реки и различными условиями замерзания на отдельных участках, для исследования были выделены два отдельных характерных района – устье (квадрат с координатами 40 – 45 г. в. д. и 63 -65 г. с. ш.) и исток (квадрат с координатами 45 – 50 г. в. д. и 63 -60 г. с. ш.), с гидрологическими постами Архангельск, Усть-Пинега и Великий Устюг, Медведки, соответственно.

4.2 Программное обеспечение

Программа долгосрочного прогноза погоды "Долгосрочный синоптик" разработана и работает в программной среде Windows 8.1.

Программа предназначена для разработки долгосрочных прогнозов погоды на месяцы и сезоны с помощью синоптических методов, а также для визуализации и интерпретации численных прогнозов погоды, разработанных с использованием моделей для месяцев и сезонов.

Инструмент позволяет разрабатывать прикладные прогнозы замерзания водоемов на срок до сезона, используя данные повторного анализа и модельных расчетов

4.3 База данных

Для составления долгосрочных прогнозов были использованы данные реанализа, полученные из существующего инструментария системы «синоптик-долгосрочник».

Данные реанализа представляются на регулярной координатной сетке, где нет пропущенных данных. В данной работе использовались данные реанализа, разрабатываемых по модели GFS с шагом сетки 1 градус.

С целью автоматизации процесса разработки прогнозов в вероятностных терминах, визуализации и анализа прогностической информации и оценки качества прогнозов, в данной работе использовалась специализированная информационно-вычислительная система «Синоптик-долгосрочник».

Программа долгосрочного прогноза погоды использует данные из 10 других оперативно поддерживаемых прогностических центров и научных проектов:

1. NOAA/NO/ESRL PSD при поддержке проекта "NCEP / NCAR ", Боулдер, Колорадо, США;
2. Проект 20th Century Reanalysis поддерживается Министерством энергетики США, Управлением инновационных и новых вычислительных исследований для теоретических и экспериментальных программ (DOE), Управлением биологических и экологических исследований и Управлением Климатической

программы Национального управления океанических и атмосферных исследований.";

База данных, используемая программой, содержит 19 гидрометеорологических параметров, т.е.:

- 1) Приземное атмосферное давление (Гектопаскаль);
- 2) Температура воздуха на высоте 2 метра (градусы Цельсия);
- 3) Температура на уровне моря (градусы Цельсия);
- 4) Осадки по данным повторного анализа (килограмм/квадратный метр);
- 5) Высота снежного покрова (в метрах);
- 6) Сплоченность льда (в процентах);
- 7) Высота поверхности 1000, 850, 700, 500, 300, 100 гПа (в декаметрах);
- 8) Температура воздуха на поверхности 1000 и 850 гПа (градусы Цельсия);
- 9) Составляющие скорости ветра на высоте 10 метров (метров в секунду).

Аномальные значения этих параметров рассчитываются как разница между значением гидрометеорологического параметра и его нормой в каждом узле общей сетки данных.

10 типов индексов циркуляции вычисляются отдельной процедурой в программе:

- 1) Среднемесячный индекс Северной Атлантики, рассчитанный в соответствии с классической схемой колебания;
- 2) Среднемесячный индекс Тихоокеанского колебания;
- 3) Среднемесячный индекс южного колебания;

- 4) Среднемесячный индекс арктических колебаний;
- 5) Среднесуточный, среднемесячный и среднегодовой индекс циркуляции Каца для отдельных регионов мира;
- 6) Среднемесячный и среднесуточный индекс восточно-атлантического колебания;
- 7) Среднемесячный и среднесуточный индекс западноатлантического колебания;
- 8) Среднемесячные и среднесуточные индексы Тихоокеанско-Североамериканского колебания;
- 9) Среднемесячный и среднесуточный индекс колебаний в западной части Тихого океана;
- 10) Среднемесячный и среднесуточный индекс евразийских колебаний;

Для визуализации и интерпретации ансамблевого прогноза на 3 месяца вперед, используются данные 40 членов ансамбля модели CFS v2, выпускаемой в NCEP/NCAR:

- 1) Приземное атмосферное давление (гПа);
- 2) Температура воздуха высотой 2 метра (градусы Цельсия);
- 3) Осадки (кг/ квадратный метр);
- 4) Высота поверхности 500 гПа (декаметр);
- 5) Температура воздуха на поверхности 850 гПа (по Цельсию);

4.4 Статистические методы обработки данных

В данной работе, для оценки качества данных, использовался коэффициент корреляции R, а также, метод оценки его статистической

значимости, с помощью критерия Стьюдента. Они будут рассмотрены ниже.

В теории вероятностей и статистике коэффициент корреляции, или коэффициент парной корреляции, является показателем изменяющейся природы двух случайных переменных. Коэффициент корреляции представлен буквами R и r . Это безразмерная величина, то есть единицы измерения не существует. Диапазон коэффициентов корреляции изменяется от -1 до +1. Если значение по модулю близко к 1, это означает, что существует сильная связь (коэффициент корреляции равен 1, речь идет о функциональных связях), а если оно близко к 0, то оно слабое.

Коэффициент корреляции R считается по формуле (1)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{cp})(x_i - x_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}} \quad (1)$$

где y_i – стационарные данные, x_i – данные реанализа.

Процедура проверки значимости начинается с принятия нулевой гипотезы H_0 . В общем виде, суть ее заключается в отсутствии каких-либо существенных различий между параметром выборки и параметром генеральной совокупности. В противном случае, принимается альтернативная гипотеза H_1 , которая состоит в том, что между параметрами различия имеются. Например, при проверке наличия корреляции в генеральной совокупности нулевая гипотеза заключается в том, что истинный коэффициент корреляции равен нулю $H_0: \rho = 0$. Если в результате проверки окажется, что нулевая гипотеза не приемлема, то выборочный коэффициент

корреляции $r_{x,y}$ значимо отличается от нуля (нулевая гипотеза отвергается и принимается альтернативная H_1).

При проверке значимости исследователь устанавливает уровень значимости α , который дает определенную практическую уверенность в том, что ошибочные заключения будут сделаны только в очень редких случаях. Уровень значимости выражает вероятность того, что нулевая гипотеза H_0 отвергается в то время, когда она в действительности верна. Ясно, что имеет смысл выбирать эту вероятность как можно меньшей.

Пусть известно распределение выборочной характеристики, являющейся несмещенной оценкой параметра генеральной совокупности. Выбранному уровню значимости α соответствуют под кривой этого распределения заштрихованные площади (см. рис. 1). Незаштрихованная площадь под кривой распределения определяет вероятность $p = 1 - \alpha$

Границы отрезков на оси абсцисс под заштрихованными площадями называют критическими значениями, а сами отрезки образуют критическую область, или область отклонения гипотезы.

Когда же надо убедиться в том, что одна величина в среднем строго больше или меньше другой, используется односторонняя критическая область. Если распределение выборочной характеристики симметрично, то уровень значимости двусторонней критической области равен α , а односторонней $-\frac{\alpha}{2}$ (см. рис. 4.1). Далее мы лишь укажем критерии значимости для различных процедур, не останавливаясь на их построении.

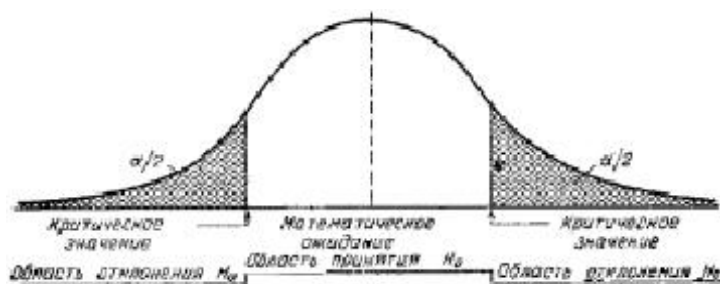


Рис. 4.1 – Проверка нулевой гипотезы H_0

Проверяя значимость коэффициента парной корреляции, устанавливают наличие или отсутствие корреляционной связи между исследуемыми явлениями. При отсутствии связи коэффициент корреляции генеральной совокупности равен нулю ($\rho=0$). Процедура проверки начинается с формулировки нулевой и альтернативной гипотез:

H_0 : различие между выборочным коэффициентом корреляции r и $\rho = 0$ незначимо,

H_1 : различие между r и $\rho=0$ значимо, и, следовательно, между переменными y и x имеется существенная связь. Из альтернативной гипотезы следует, что нужно воспользоваться двусторонней критической областью.

Выборочный коэффициент корреляции при определенных предпосылках связан со случайной величиной t , подчиняющейся распределению Стьюдента с $f=n-2$ степенями свободы.

Вычисленная по результатам выборки статистика, рассчитывается по формуле [4.2]

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad [4.2]$$

И сравнивается с критическим значением, определяемым по таблице распределения Стьюдента при заданном уровне значимости α и $f=n-2$ степенях свободы. Правило применения критерия заключается в следующем: если, $t > t_{кр}$, то нулевая гипотеза на уровне значимости α отвергается, т. е. связь между переменными значима; если $t < t_{кр}$, то нулевая гипотеза на уровне значимости α принимается. Отклонение значения r от $\rho=0$ можно приписать случайной вариации. Данные выборки характеризуют рассматриваемую гипотезу как весьма возможную и правдоподобную, т. е. гипотеза об отсутствии связи не вызывает возражений.

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Проверка корреляционной связи между фактическими данными и данными реанализа.

На первом этапе работы с помощью программы «Синоптик Долгосрочник» мною были построены графики сумм морозодней для всех лет временного периода с 1959 по 1980 гг. Пример графика для истока реки Северная Двина представлен на рис. 5.1.1.

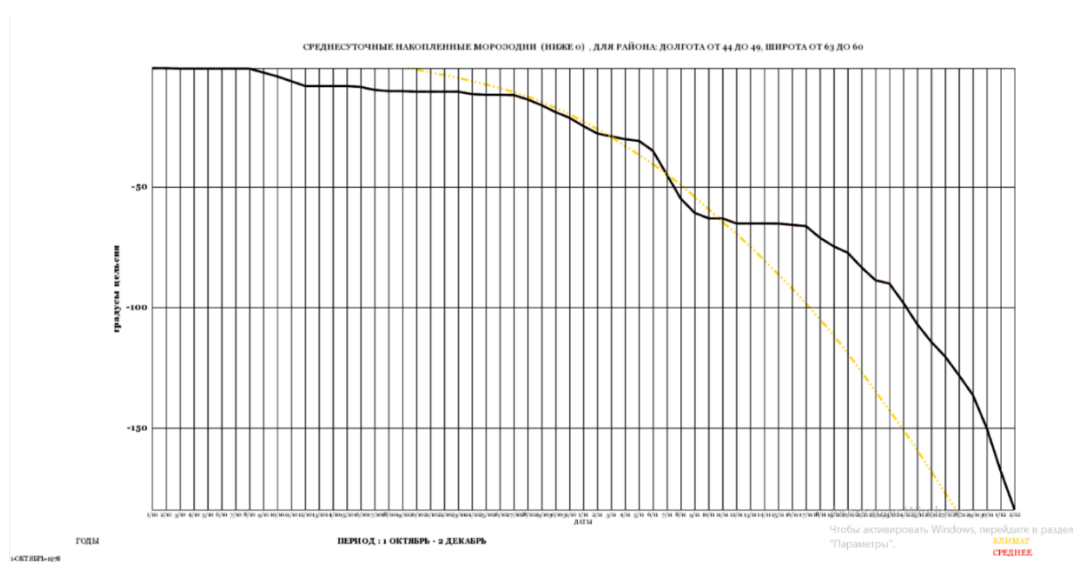


Рис. 5.1.1 – Пример графика накопленных отрицательных температур (сумм морозодней).

График построен за 90 дней холодного периода с 1.10.1978 по 2.12.1978. Суммы морозодней получены по реанализу приземной температуры воздуха осредненной по району, ограниченному координатами от 44 до 49 гр. в.д. и от 60 до 63 гр. с.ш. Черным цветом выделен график сумм морозодней для 1978 года, а желтым — климатическая норма. Вертикальная ось — это ось температур (гр. С), а

горизонтальная – временная шкала. Значение суммы морозодней определяется на дату замерзания. В данном случае – по данным гидрологического поста Медведки - замерзание произошло 1.12.1978, что значительно позже климатического среднего. Информация о датах замерзания на разных гидрологических постах Северной Двины была получена из Гидрологических ежегодников

Таким образом, с графиков были сняты значения величины суммы морозодней, накопленных за холодный период года, к моменту появления на этом посту ледового покрова в каждом изучаемом году (табл. 5.1.1).

Год	Накопленные отрицательные температуры для станций	
	Медведки	Усть-Пинега
1959	-	-50
1961	-110	-90
1962	-270	-
1963	-430	-42
1964	-120	-60
1965	-80	-170
1966	-40	-110
1967	-200	-45
1968	-195	-80
1969	-115	-83
1970	-75	-95
1971	-160	-37
1972	-30	-40
1973	-205	-105
1974	-40	-45
1975	-33	-35
1976	-	-50
1977	-180	-180
1978	-170	-110

1979	-55	-90
1980	-100	-35
Среднее	-137.2	-77.6

Табл. 5.1.1 Накопленные суммы морозодней, при которых произошло появление льда, на постах Медведки и Усть-Пинега

Были отдельно рассчитаны суммы морозодней для устья и истока Северной Двины (пост Усть-Пинега и Медведки соответственно). Результаты также представлены в Таблице 5.1.1. Средние суммы морозодней, необходимые для установления постоянного ледового покрова сильно отличаются для различных участков реки и составляют $-137,2\text{ C}^{\circ}$ для истока и $-77,6\text{ C}^{\circ}$ для устья.

Для установления возможности использования данных численного прогнозирования для расчёта прогностической даты установления ледового покрова нам необходимо выяснить уровень связи между фактическими данными наблюдений с гидрологических постов и прогностическими данными температуры, используемыми в численных моделях.

Для этого было проведено сравнение данных реанализа температуры воздуха на высоте 2 метра и высоте 1000 гПа с фактическими данными наблюдений за температурой, поступающих с гидрологических постов в холодный период (октябрь – апрель) за 1990 - 2020гг. Температура на двух уровнях была использована для того, чтобы определить какие именно данные реанализа температуре наиболее точно описывают фактические данные наблюдений. Фактические данные о температуре на гидрологических постах были получены с интернет-ресурса [rp5 \(https://rp5.ru/\)](https://rp5.ru/). Для нашего исследования были выбраны две станции в характерных районах – Великий Устюг (исток) и Архангельск (устье). Данные наблюдений температуры воздуха на этих станциях представлены в таблицах (Табл. 5.1.2 и Табл.5.1.3)

Температура на ст. Архангельск (устье)		Температура на ст. Великий Устюг (исток)	
Данные реанализа	Фактические данные	Данные реанализа	Фактические данные
2.56549	1.5	3.4	8.1
1.3647	0.4	1.9	5
-0.105087	-0.3	0.1	4.8
-1.5	-0.9	-1.7	7.5
-2.5	-4.9	-4.0	6.1
-3.1	-2.5	-2.3	7.9
-2.8	-3.9	0.7	9.6
-0.9	-3.8	2.2	11.6
0.7	1.3	2.8	6.5
2.8	4.1	2.7	9.4
3.9	4.8	4.7	9
1.6	1.8	3.4	7.7
0.8	1.3	-0.1	4.5
2.0	1	-0.7	6.8
1.7	3.1	2.5	7.9
1.5	-1.6	-0.6	4.6
5.8	4.3	-0.6	8.3
5.7	6.7	5.9	11.4
-0.4	1	0.6	11

Табл. 5.1.2. Фрагмент данных реанализа и данных наблюдений за температурой воздуха на высоте 2 м для устья и истока Северной Двины

Температура на ст. Архангельск (устье)		Температура на ст. Великий Устюг (исток)	
Данные реанализа	Фактические данные	Данные реанализа	Фактические данные
2.9	1.5	4.5	8.1
1.0	0.4	2.5	5
-0.4	-0.3	0.5	4.8
-0.6	-0.9	-1.9	7.5
-1.5	-4.9	-4.0	6.1
-2.3	-2.5	-3.0	7.9
-1.2	-3.9	0.1	9.6
0.6	-3.8	1.4	11.6
2.2	1.3	1.9	6.5
3.6	4.1	3.2	9.4
4.8	4.8	6.3	9
1.6	1.8	4.1	7.7
0.6	1.3	-0.4	4.5
2.5	1	-0.7	6.8
0.9	3.1	1.9	7.9
0.8	-1.6	-2.7	4.6
6.5	4.3	-1.9	8.3
4.9	6.7	6.4	11.4
-0.5	1	-0.6	11

Табл. 5.1.3. Фрагмент данных реанализа температуры воздуха на уровне 1000 гПа и данных наблюдений за температурой воздуха на высоте 2 метра для устья и истока Северной Двины.

Для определения связности данных реанализа и данных фактических наблюдений мною был произведен расчет корреляции между ними.

Коэффициент корреляции Пирсона между среднесуточными данными реанализа температуры воздуха на высоте 2 м и на уровне 1000 гПа и

фактическими данными наблюдений, рассчитанный для двух гидрологических постов, представлен в Таблице 5.1.4.

Значение коэффициента R		
	ст. Архангельск (устье)	ст. Великий Устюг (исток)
Температура на высоте 2м	0.902	0.734
Температура на уровне 1000 гПа	0.003	0.025

Табл. 5.1.4. Коэффициент корреляции между среднесуточными данными реанализа температуры воздуха на высоте 2 м и на уровне 1000 гПа и фактическими данными наблюдений для устья и истока реки Северная Двина

Для оценки статистической значимости полученных результатов, была проведена процедура проверки. Нами были рассчитаны уровни значимости для коэффициентов корреляций для всех станций по формуле 1, и сопоставлены с критическим значением $t_{кр.}$, полученным из таблиц. Для данных рядов, с количеством элементов n , и при заданном уровне значимости $\alpha=0,05$, получены следующие результаты, представленные в таблице 5.1.5

	1000м		т2м	
	Архангельск	Великий Устюг	Архангельск	Великий Устюг
N	6429	6431	6401	6431
n-2	6427	6429	6399	6429
T	0.2	1.4	167.1	86.7
T _{кр}	1.9	1.9	1.9	1.9

Таблица 5.1.5 Результаты проверки уровня значимости коэффициентов корреляции для среднесуточных температурных данных реанализа и фактических гидрологических пунктов Архангельск и Великий Устюг на уровне 1000 гПа и 2 метра

Из представленных в таблице 5.5 результатов, можно сделать вывод, что значение коэффициента Стьюдента t ниже критического для данных с обеих станций, полученных на уровне 1000 гПа, а значит коэффициент корреляции нельзя считать статистически значимым. Для данных, полученных на уровне 2 м, коэффициент Стьюдента попадает в критическую область, а значит коэффициент корреляции считается значимым.

Таким образом, исходя из представленных в Таблице 5.1.4. данных расчетов можно сделать следующие выводы:

- Коэффициенты корреляции, рассчитанные по данным температуры воздуха на уровне 2 метра, между данными реанализа и данными наблюдений значительно выше, чем для данных реанализа на уровне 1000 гПа и данными наблюдений на уровне 2 метра.
- Коэффициенты корреляции, рассчитанные по данным температуры воздуха на уровне 2 метра, между данными реанализа и данными наблюдений, статистически значимы и составляют +0,9 и +0,7 для устья и истока соответственно.
- Коэффициенты корреляции между среднесуточными данными реанализа температуры воздуха на уровне 1000 гПа и фактическими данными наблюдений статистически незначимы и в дальнейших расчетах не участвуют.

5.2 Средние суммы морозодней

Далее, мною были рассчитаны средние суммы морозодней, накопленные к моменту установления ледового покрова, как по данным реанализа, так и по фактическим данным. Результаты расчётов представлены в таблице 5.2.1 и таблице 5.2.2 для гидрологических постов Архангельск и Великий Устюг, соответственно.

Гидрологический пост Архангельск				
год	Дата замерзания	Сумма морозодней по фактическим данным	Сумма морозодней по данным реанализа	Дата фактического замерзания в днях от начала года
2008	27.12	-132.3	-194.5	362
2009	8.12	-106.3	-167.3	342
2010	24.11	-88.6	-78.5	328
2011	17.11	-32.5	-26.7	348
2012	21.12	-345.1	-407.3	356
2013	7.12	-94.6	-127.6	338
2014	24.11	-174.2	-134.5	328
2015	23.11	-118.9	-127.8	327
2016	7.11	-80.9	-69.5	312
2017	11.12	-166.6	-121.4	345
2018	10.1	-432.7	-413.3	375
средние значения		-161.2	-169.9	342

Табл. 5.2.1. Средние суммы морозодней, накопленные к моменту установления ледового покрова для гидрологического поста Архангельск.

Гидрологический пост Великий Устюг				
Год	Дата замерзания	Накопленные отрицательные температуры (фактические данные)	Накопленные отрицательные температуры (данные реан.)	Дата фактического замерзания в днях
2008	27.12	-84.1	-172.9	362
2009	16.12	-81.7	-315.9	350
2010	27.11	-16	-104.2	331
2011	21.11	-10.1	-88.2	352
2012	9.12	-37	-221.9	344
2013	8.12	-17.6	-211	339
2017	12.12	-27.5	-305.6	346
2018	29.11	-35.5	-185.3	332
среднее значение		-38.7	-200.6	345

Табл. 5.2.2. Средние суммы морозодней, накопленных к моменту установления ледового покрова для гидрологического поста Великий Устюг.

Исходя из представленных в таблицах расчётов, можно сделать следующие выводы:

- 1) Для гидрологического поста Архангельск средние значения по фактическим данным и по данным реанализа составили -161,2 и -169,9,

соответственно, что является достаточно близкими значениями – разница составляет 8,7 градусов. Данные сумм морозодней по реанализу и данным наблюдений близки.

2) Для гидрологического поста Великий Устюг средние значения морозодней по фактическим и данным реанализа составили -38,7 и -200.6, соответственно. Разница значительна, и составляет 161,9 градус. Использование данных реанализа для расчета сумм морозодней некорректно.

5.3 Прогноз замерзания с использованием сумм морозодней по синоптическому методу.

В данной работе предлагается оценить возможность использования синоптических долгосрочных прогнозов, разработанных в предшествующие 10 лет для оценки качества метода прогноза замерзания рек по суммам морозодней.

Синоптический долгосрочный прогноз погоды при помощи набора лет гомологов имеет те же методические основы, что и ансамблевый прогноз, разрабатываемый при помощи численной гидродинамической модели [13].

Гомолог, осредненный в группу предполагает, что для реализации определенного сценария макропогоды требуется существование соответствующего аналогичного состояния в предшествующем прогнозу момента времени и аналогичности краевых условий подстилающей поверхности. Поскольку каждый индивидуальный, год гомолог, входящий в групповой аналог уникален, то незначительные отличия в начальных и граничных условиях приводят к реализации различных, а иногда и диаметрально

противоположных прогнозов. Подход, основанный на незначительном изменении начальных условий для расчета циркуляционных характеристик прогностического месяца, используется для генерации множества членов ансамбля гидродинамической модели. Исходя из сходства методологии получения группового гомолога и прогностического ансамбля гидродинамической модели, прогноз по групповому гомологу можно рассматривать как реализацию ансамблевого прогноза, полученную по «природной модели» [14].

В связи с изложенным, оценка возможности использования результатов прогнозов по синоптическому методу и численному методу, расчеты по которым основаны на одном и том же типе данных, должны привести к схожему результату. В связи с недостаточным размером архива прогнозов, полученных численным, ансамблевым методом, мною была предпринята попытка провести проверку применимости метода прогноза сумм морозодней на базе данных прогнозов, полученных при помощи синоптического метода группового гомолога.

Использованные в исследовании синоптические прогнозы разрабатывались с использованием тех же данных реанализа приземной температуры воздуха, что и численные ансамблевые прогнозы. Для каждого прогноза был подобран набор лет гомологов, осреднением он и получен. Годы-гомологи - это те годы, в которых в предшествующий прогнозу период наблюдались схожие с текущими макросиноптические процессы. Считается, что набор лет-гомологов аналогичен набору членов ансамбля численного прогноза.

Архив прогнозов за десятилетний период был любезно предоставлен Северо-Западным УГМС.

По данным о годах-гомологах в каждом из лет периода с 2008 по 2018 годы были построены прогностические графики морозодней и

произведено сравнение прогностических результатов, полученных как среднее значение сумм морозодней для всех лет гомологов и фактических данных о замерзании рек. В таблице 5.3.1 приведен список лет-гомологов, использовавшихся для построения прогностических графиков

Год прогноза	Состав группы прогноза
2001	1983, 1948, 1957
2002	1997, 1952, 1945, 1941
2003	1999, 1997, 1960, 1931, 1927
2004	2003, 1966
2005	1943, 1937
2006	2002, 1997, 1995
2007	1943, 1924
2008	2007, 2001, 1999
2009	2003, 1995, 1980, 1926
2010	2005, 2001, 1954
2011	1958, 1934
2012	2011, 2009, 2003, 1926
2013	2012, 2011, 2005, 2001, 1996, 1991
2014	2005, 2004, 1917
2015	2014, 1958, 1902
2016	2007, 1933, 1908
2017	2010, 2001, 1955
2018	1989, 1955, 1925
2019	2012, 2011, 1911

2020	2014, 2005, 2004, 2003
2021	2017, 2013, 2004, 1973

Таблица 5.3.1 Список прогностических лет-гомологов для периода 2001г – 2021г предоставленных Северо-Западным УГМС

С помощью программы «Синоптик-Долгосрочник», мною были построены графики для устья (координаты 40-45 гр. в. д. и 63-65 гр. сев. ш), для истока (координаты 45-50 гр. в. д. и 60-63 гр. сев. ш) и сопоставлены с данными о фактическом установлении постоянного ледостава за эти годы на постах Архангельск и Великий Устюг, соответственно.

Ниже приведены примеры графиков для устья (рис. 5.3.1) и истока (рис. 5.3.2)

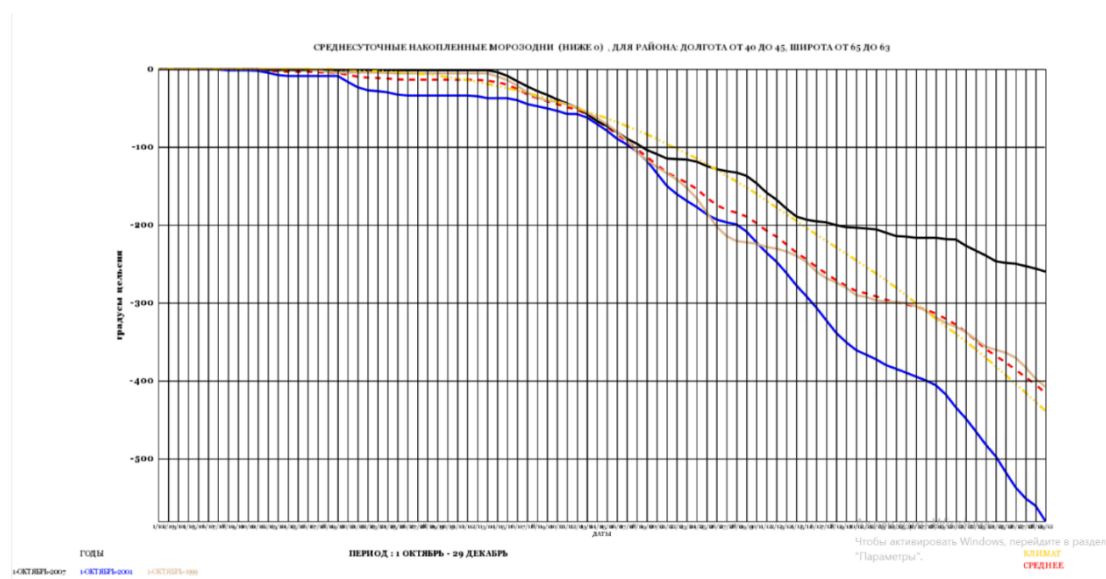


Рис. 5.3.1 – Прогноз морозодней, основанный на данных о годах-гомологах, для устья реки Северная Двина за 2008 г.

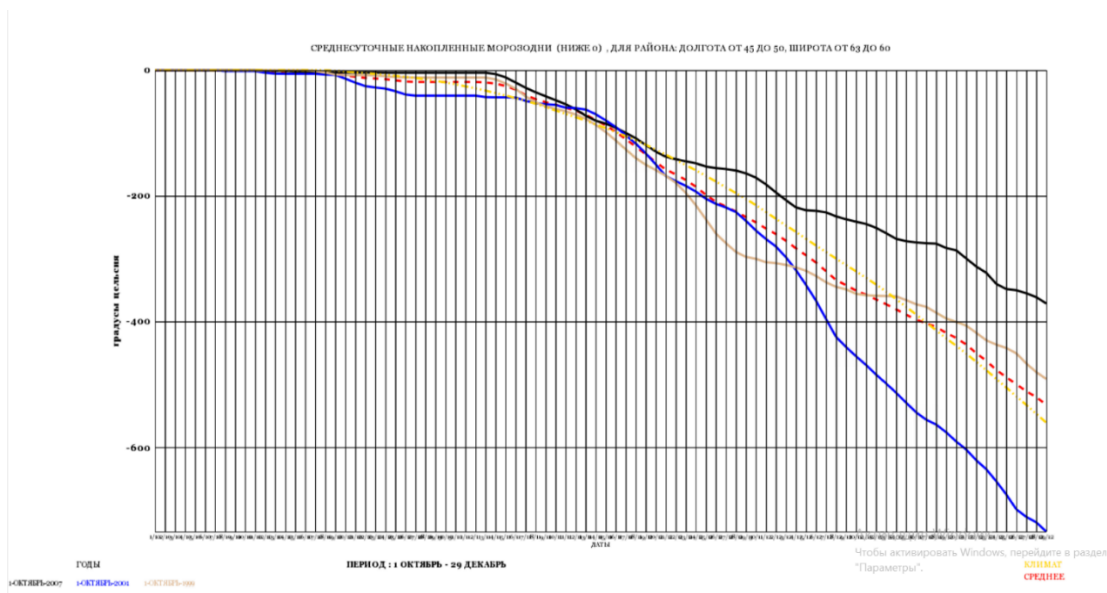


Рис. 5.3.2 – Прогноз морозодней, основанный на данных о годах-гомологах, для истока реки Северная Двина за 2008 г.

Графики построены за холодный период с 1.10.2008 по 29.12.2008. Вертикальная ось — это ось температур (гр. С), а горизонтальная — временная шкала. Желтым отмечена кривая климатической нормы, красным — среднее по годам-гомологам. Остальные кривые представляют собой ход морозодней за выбранные года-аналоги. Прогнозируемая дата замерзания определяется по средней сумме прогностических морозодней, рассчитанных для устьевого района и района истока. Для станции устьевого района (станция Архангельск) средняя сумма морозодней составляет -161.2, для района истока (станция Великий Устюг) -38.7

Таким образом, по графикам была получена информация о прогнозируемой, на основе прогностических лет-гомологов, дате замерзания для устья (табл. 5.3.2), и истока (табл. 5.3.3)

Гидр. пост Архангельск (устье)		
Год	Дата замерзания фактическая (в днях от 1 января)	Прогностическая дата замерзания (в днях от 1 января)
2008	362	330
2009	342	331
2010	328	337
2011	348	340
2012	356	342
2013	338	345
2014	328	336
2015	327	351
2016	312	322
2017	345	330
2018	375	331
Средняя ошибка прогноза		17

Табл. 5.3.2 Прогнозируемые и фактические даты замерзания (в днях)
устья реки Северная Двина за период 2008г – 2018г

Гидр. пост Великий Устюг (исток)		
Год	Дата замерзания фактическая (в днях от 1 января)	Прогностическая дата замерзания (в днях от 1 января)
2008	362	318
2009	350	306
2010	331	319
2011	352	320
2012	344	308
2013	339	320
2017	346	313
2018	332	313
Средняя ошибка прогноза		30

Табл. 5.3.3 Прогнозируемые и фактические даты замерзания (в днях) истока реки Северная Двина за период 2008г – 2013г и 2017г – 2018г

Из представленных в таблицах данных, можно сделать следующие выводы:

- 1) Средняя ошибка прогноза по ансамблю лет-гомологов составляет для устья 17 дней и 30 дней для истока
- 2) В годы с наибольшей ошибкой прогноза (2008, 2015, 2018 для устья и 2008, 2009, 2011, 2012 и 2017 для истока), максимально составившей 44 дня для обоих участков реки, по данным о ледовых явлениях, полученных с гидрологических постов, наблюдалось неустойчивое,

аномально раннее/аномально позднее замерзание, обусловленное сложными синоптическими и гидрологическими условиями, когда установление и сход льда происходил неоднократно.

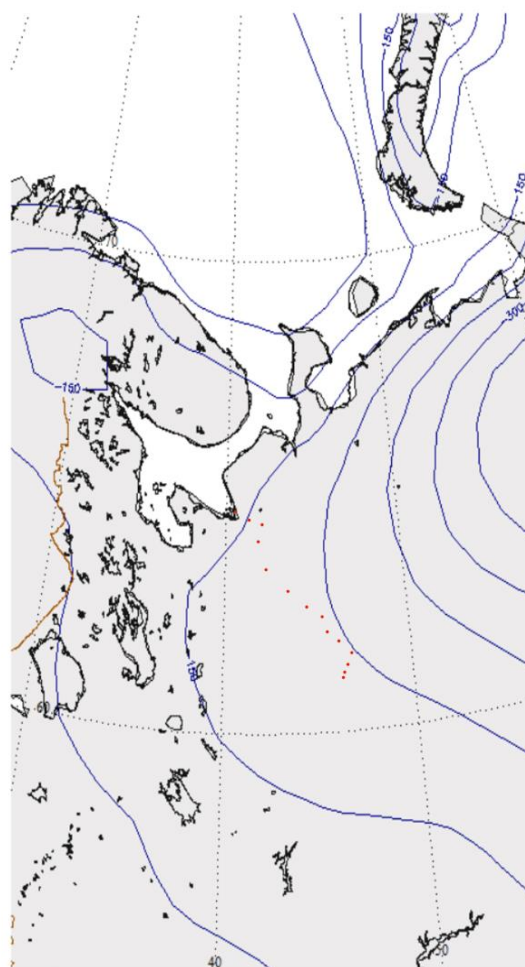
3) Ошибка прогноза для устья меньше, чем для истока. Минимальная ошибка составила 7 дней для поста Архангельск и 12 дней – для Великого Устюга.

4) Важно отметить, что при исключении лет с экстремальными условиями замерзания, приводившими к неустойчивому замерзанию, средняя ошибка прогноза сокращается, и составляет 10 дней для устья и 13 дней для истока

5) В связи с недостаточным для статистического анализа количеством данных и большим разбросом значений, сделать однозначный вывод о качестве синоптического прогноза замерзания по годам-гомологам не предоставляется возможным.

Для более детального рассмотрения полученного прогноза, мною были отрисованы карты географического распределения значений сумм морозодней для всей территории бассейна Северной Двины, на даты прогнозируемого установления ледостава.

Примеры карт сумм морозодней представлены на рис. 5.3.3 и рис. 5.3.4



А
Ч
Г

Рис. 5.3.3 – Карта географического распределения значений сумм морозодней, построенная на 25.11. 2008 (дата достижения необходимых сумм морозодней для устья реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по годам-гомологам)

СРЕДНЕСУТОЧНЫЕ СУММЫ МОРОЗОДНЕЙ (НИЖЕ 0)
 ПЕРИОД: 1 ОКТЯБРЬ - 12 НОЯБРЬ
 СОСТАВ ЛЕТ: 2007, 2001, 1999,

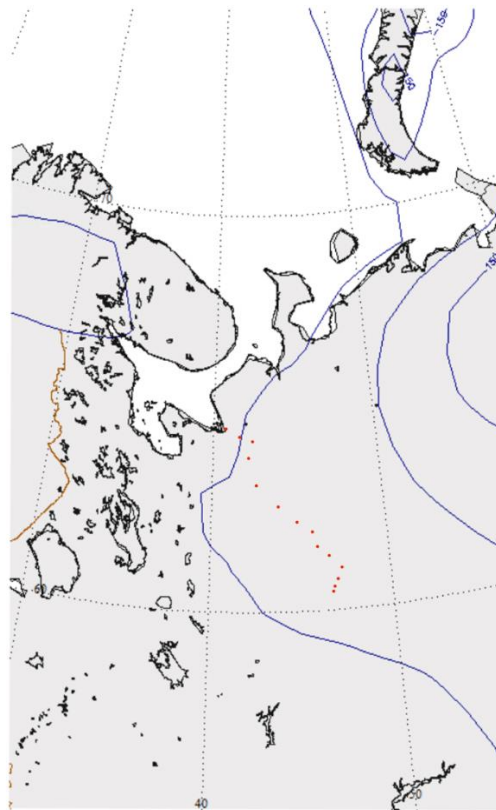


Рис. 5.3.4 – Карта географического распределения значений сумм морозодней, построенная на 12.11. 2008 (дата достижения необходимых сумм морозодней для истока реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по годам-гомологам)

Синим на картах отмечены изолинии накопленных сумм морозодней на дату прогноза. Красными точками – течение реки Северная Двина. На представленных примерах карт можно увидеть, что 25.11.2008 весь бассейн реки оказывается в зоне накопленных отрицательных температур от -150 до -200, что является достаточным для полного замерзания на всех участках. В то время как 12.11.2008 большая часть бассейна располагается в пределах от -50 до -75 морозодней, что

является достаточным для установления ледового покрова в истоке реки, но не в устье.

Анализируя карты распределения сумм морозодней, были получены следующие результаты (табл. 5.3.4)

Год	дата	устье (г. п. Архангельск)		исток (г. п. Великий Устюг)	
		морозодни	замерзание	морозодни	замерзание
2008	12.11	<-50	-	-75	+
	25.11	-150	?	-200	+
2009	2.11	<-50	-	-50	+
	27.11	-150	+	-175	+
2010	15.11	-50	-	-50	+
	3.12	-150	+	-175	+
2011	14.11	<-50	-	<-50	?
	6.12	-200	+	-300	+
2012	4.11	<-50	-	<-50	?
	7.12	-150	+	-200	+
2013	14.11	<-50	-	<-50	+
	11.12	-150	+	-200	+
2014	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
	2.12	-150	+	-175	+
2015	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
	17.12	-350	+	<-500	+
2016	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.	н. д.
	17.11	-150	?	-200	+
2017	9.11	<-50	-	<-50	?
	26.11	-150	?	-175	+
2018	9.11	-50	-	-50	+

	27.11	-175	+		-200	+	
--	-------	------	---	--	------	---	--

Табл. 5.3.4 Сводная таблица накопленных к дате прогноза сумм морозодней для устья и истока Северной Двины

Сведения о суммах морозодней на том или ином участке реки были получены из карт распределения сумм морозодней. Выводы о замерзании реки в устье и истоке основывались на сопоставлении спрогнозированных сумм морозодней, и средних сумм морозодней, необходимых для установления ледостава (- 161 для устья и -38 для истока). «+» отмечались достаточные, для установления постоянного ледостава условия, «-» - недостаточные. Знаком вопроса отмечались значения морозодней близкие к достаточным, но требующие дальнейшего анализа. Такие случаи, и случаи, когда накопленных морозодней было значительно больше, чем средние суммы морозодней, необходимых для замерзания, отмечены желтым.

Для случаев, когда на прогнозируемую дату замерзания на исследуемых участках реки были избыточные, или недостаточные накопленные отрицательные температуры по картам сумм морозодней, были построены новые карты, с уточненной датой прогноза (приложение В). Уточненный прогноз даты установления постоянного ледостава представлен в таблице 5.3.5 и 5.3.6

Год	Гидрл. пост Архангельск (устье)	
	Дата замерзания (года-гомологи)	Уточненная дата замерзания (карты сумм морозодней)
2008	25.11	27.11
2011	6.12	6.12
2015	17.12	26.11

2016	17.11	25.11
2017	26.11	28.11
2018	27.11	27.11

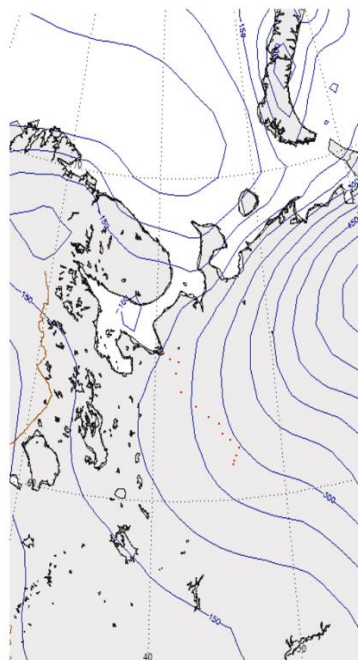
Табл. 5.3.5 Уточненный на основе анализа карт сумм морозодней прогноз даты замерзания для устья реки Северная Двина

Год	Гидрл. пост Великий Устюг (исток)	
	Дата замерзания (года-гомологи)	Уточненная дата замерзания (карты сумм морозодней)
2011	14.11	11.11
2017	9.11	16.11

Табл. 5.3.6 Уточненный на основе анализа карт сумм морозодней прогноз даты замерзания для истока реки Северная Двина

Слева в таблицах представлены даты замерзания реки основанные на прогнозе полученном как среднее по ансамблю лет-гомологов, справа – уточненные даты прогноза полученные при анализе карт географического распределения сумм морозодней. Желтым отмечены случаи, когда при смещении в ту или иную сторону даты прогноза количество морозодней становилось недостаточным для замерзания исследуемого участка реки. Таким образом, в некоторых случаях, были оставлены первоначальные даты прогноза. Пример представлен на рисунке 5.3.5

СРЕДНЕСУТОЧНЫЕ СУММЫ МОРОЗОДНЕЙ (НИЖЕ 0)
 ПЕРИОД: 1 ОКТЯБРЬ - 6 ДЕКАБРЬ
 СОСТАВ ЛЕТ: 2001, 1991,



СРЕДНЕСУТОЧНЫЕ СУММЫ МОРОЗОДНЕЙ (НИЖЕ 0)
 ПЕРИОД: 1 ОКТЯБРЬ - 5 ДЕКАБРЬ
 СОСТАВ ЛЕТ: 1951, 1994,

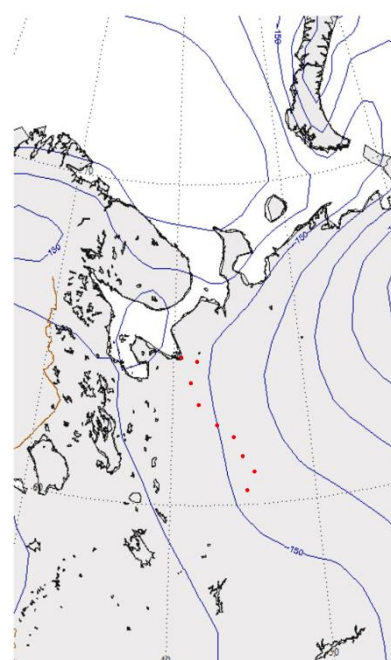


Рис. 5.3.5 – Карты распределения сумм морозодней на 6.12.11 (слева) и 5.12.11 (справа)

На представленном рисунке видно, что на спрогнозированную дату замерзания (6.12.11, для устья) весь бассейн реки Северная Двина располагается в зоне накопленных морозодней ниже -200, что значительно превышает необходимое количество сумм морозодней для фактического замерзания реки. Однако, при рассмотрении ситуации за предшествующую дату 05.12.11 видно, что устье реки Северная Двина оказывается в зоне, где накопленных сумм морозодней, недостаточно для замерзания реки (ближайшая изолиния -150 не охватывает всю территорию бассейна).

Далее, годы с уточненной датой прогноза были включены в общий ряд данных, и полученный результат был сравнен с исходным прогнозом и фактическими датами замерзания. Результаты представлены в табл. 5.3.7 и 5.3.8

Для гидр. поста Архангельск			
год	Морозодни фактически е	Морозодни прогнозируемы е	Морозодни прогнозируемы е (уточненные)
2008	362	330	332
2009	342	331	331
2010	328	337	337
2011	348	340	348
2012	356	342	342
2013	338	345	345
2014	328	336	336
2015	327	351	330
2016	312	322	340
2017	345	330	332
2018	375	331	331
Средняя прогноза ошибка		17	14

Табл. 5.3.7 Сравнение уточненного прогноза, исходного прогноза и фактических данных для устья реки Северная Двина

Для гидр. поста Великий Устюг			
год	Морозодни факт	Морозодни прогноз	Морозодни прогноз (уточненные)
2008	362	318	318
2009	350	306	306
2010	331	319	319
2011	352	320	317
2012	344	308	308
2013	339	320	320
2017	346	313	313
2018	332	313	320
Средняя ошибка прогноза		30	29

Табл. 5.3.8 Сравнение уточненного прогноза, исходного прогноза и фактических данных для истока реки Северная Двина

Также, была рассчитана средняя ошибка прогноза, и сопоставлена с ошибкой исходного прогноза по ансамблю лет-гомологов. Из представленных в таблице 5.14 и 5.15 результатов, были сделаны следующие выводы:

- 1) Средняя ошибка прогноза после его уточнения уменьшилась на 3 дня для устья и 1 день для истока.
- 2) Значительно был скорректирован прогноз для устья реки Северная Двина за 2011 год – ошибка прогноза по годам-гомологам составила 8 дней, а после уточнения по картам сумм морозодней – 0 дней. За 2015 год результат корректировки прогноза привел к сокращению ошибки прогноза на 21 день.

3) В целом, можно сделать вывод о том, что прогноз замерзания рек по ансамблю лет-гомологов может быть использован на практике.

5.4. Прогноз замерзания с использованием сумм морозодней по ансамблевому методу

Для оценки возможности использования ансамблевых прогнозов, разрабатываемых по модели NCEP CFS v2, был проведен расчет сумм морозодней по двум прогнозам – прогноз от 23 октября 2020 на ноябрь-декабрь 2020 года и прогноз от 27 октября 2021 года на ноябрь-декабрь 2021 года. По данным каждого из членов прогностического ансамбля были построены индивидуальные графики накопления сумм морозодней и средний график по ансамблю. Предполагалось, что если на какую-то дату сумма морозодней достигнет критической величины, необходимой для появления ледового покрова, то в эту дату установится ледовый покров на исследуемом участке бассейна Северной Двины. На эту же дату строились карты вероятности установления ледового покрова. Для этих карт в каждом узле регулярной сетки данных рассчитывалось отношение количества членов ансамбля, для которых сумма морозодней достигла критической, к общему количеству членов ансамбля. Предполагалось, что это отношение показывает вероятность, с которой в данной точке сумма морозодней достигает критической величины, а соответственно и вероятность, с которой может установиться ледовый покров. По полученным данным строились карты.

В качестве долгосрочного прогноза с использованием инструментов программного комплекса «Синоптик-долгосрочник» была взята модель CFS v.2, ежедневно рассчитываемая в NCEP/NCAR США и имеющаяся в свободном доступе с FTP сервера NCEP.

5.4.1 Прогноз на 2020

Дата разработки прогноза 23 октября 2020 года. Прогноз составляется на ноябрь-декабрь 2020 года. Для разработки прогноза использовалось 28 членов ансамбля.

Фактическое появление устойчивого льда по данным наблюдений – 17 декабря для гидрологического поста Архангельск (устье) и 20 ноября для гидрологического поста Великий Устюг (исток). Из представленного выше расчета средних морозодней, было установлено, что по фактическим данным, для появления устойчивого ледового покрова необходимо накопление 161.9 морозодней для устья и 38 для истока, и как правило, достижение этих сумм морозодней происходит в ноябре – декабре.

Были построены графики сумм морозодней по данным ансамблевого прогноза для устья и истока (гидрл. пост Архангельск и Великий Устюг, соответственно). Результаты представлены на рис. 5.4.1.1 и 5.4.1.2

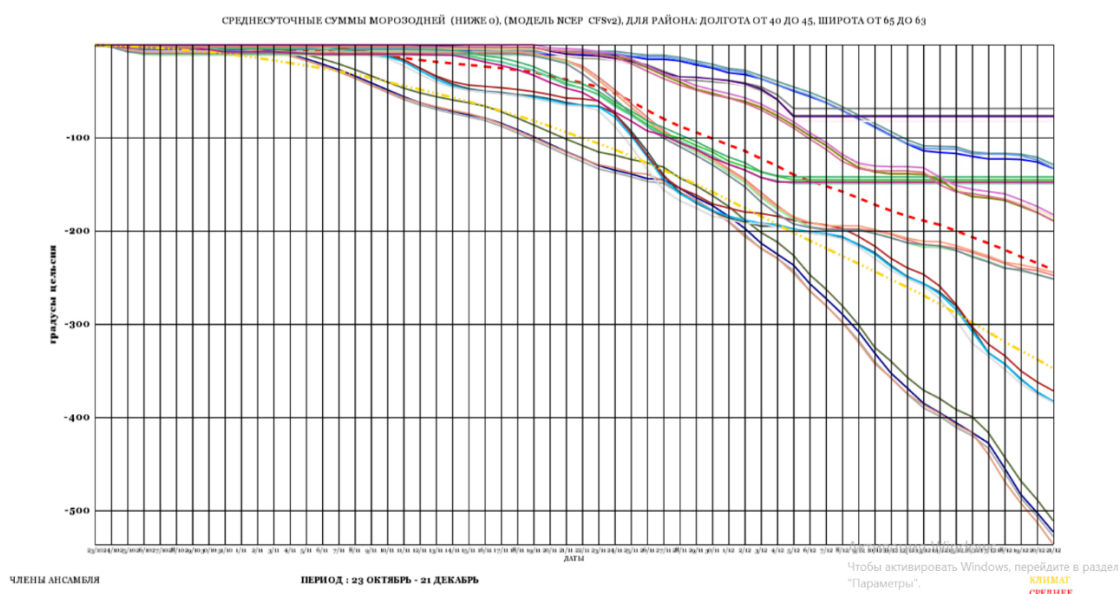


Рис. 5.4.1.1 – График сумм морозодней по данным ансамблевого прогноза для устья реки Северная Двина

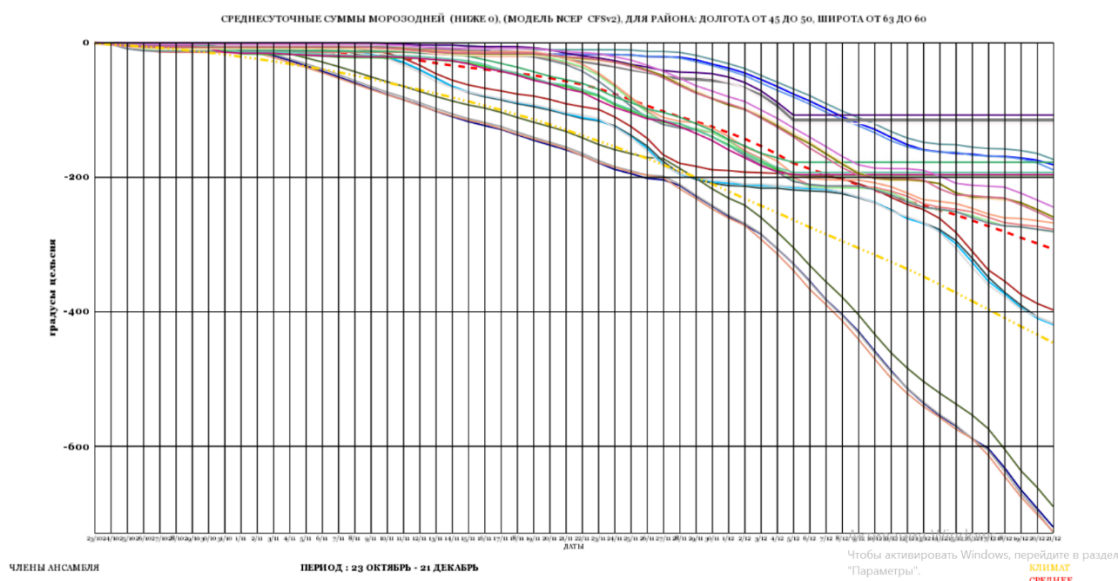


Рис. 5.4.1.2 – График сумм морозодней по данным ансамблевого прогноза для истока реки Северная Двина

Вертикальная ось на графиках – ось температур (градусы Цельсия). По горизонтали располагается временная шкала (дни). Красным пунктиром отмечено среднее значение по ансамблю, желтым – климатическая норма. Остальными линиями отмечен ход накопленных отрицательных температур по 28 членам ансамбля.

Из графика прогностических сумм морозодней для устья видно, что необходимая для замерзания сумма морозодней $-161,9$ градусов по данным среднего по ансамблю, достигается 8 декабря, что значительно позже климатической нормы. Самую раннюю дату замерзания прогнозируют 7 членов ансамбля – 28 ноября. Самая поздняя – 18 декабря – 3 члена ансамбля. Важно отметить, что по данным 9 членов ансамбля необходимая сумма морозодней не будет накоплена за выбранный временной период (с 23 октября по 21 декабря).

Из графика прогностических сумм морозодней для истока видно, что необходимая для замерзания сумма морозодней -38 градусов по данным среднего по ансамблю, достигается 15 ноября. Самую раннюю

дату замерзания прогнозируют 3 члена ансамбля – 4 ноября, что совпадает с климатической нормой. Самая поздняя – 2 декабря – 3 члена ансамбля.

Фактически, состояние ледового покрова на реке Северная Двина в зимний период 2020 было неустойчивым – отмечалось установление ледостава в более поздние сроки, на 15-30 дней позже средних многолетних значений. Появление ледостава на гидрологическом посту Архангельск произошло 17 декабря, на посту Великий Устюг – 20 ноября.

Исходя из сравнения полученных результатов с фактическими данными, можно сделать вывод, что наиболее достоверными членами ансамбля, которые указывают на фактическую дату появления льда, для устья реки являются 9, 19, 17 и 24 члены, показавшие самую позднюю дату замерзания. Эти члены ансамбля показывают начало накопления сумм градусодней мороза 19 ноября. К 17 декабря (фактическая дата замерзания) сумма накопленных градусодней мороза по этим членам ансамбля составляет от -160 до -170 морозодней.

Для истока такими членами ансамбля являются 15, 17 и 18. Необходимой для замерзания суммы морозодней они достигают 22 ноября. На фактическую дату замерзания (20 ноября) они демонстрируют накопление -20 / -30 морозодней.

В связи с тем, что в практике долгосрочного прогноза погоды отсутствует теоретическое обоснование выбора отдельных членов ансамбля из прогностической совокупности так как все члены ансамбля равновероятны, то разработать прогноз по этим членам ансамбля было невозможно, так как у нас не было оснований для их выбора.

Ошибка среднего по ансамблю прогноза замерзания на 5-7 дней, с заблаговременностью прогноза более месяца является очень хорошим результатом.

Реальным решением проблемы ансамблевого прогноза в настоящее время является составление вероятностного прогноза замерзания льда. Для получения вероятностного прогноза, в каждом узле сетки выбранного района и на выбранную дату, рассчитывается процент, который составляют те члены ансамбля из 28, в которых сумма морозодней достигла того значения, при котором на море появляется лед. Таким образом, суммы морозодней рассчитываются для каждого члена ансамбля в отдельности для каждого узла сетки. Так же в каждом узле сетки отмечают процент тех членов ансамбля, суммы морозодней в которых достигли на выбранную дату пороговой величины. По полученным данным строятся карты процента вероятности членов ансамбля, достигших на выбранную дату пороговой суммы. Карта вероятности превышения прогностической суммы морозодней показывает с какой вероятностью прогноз прогнозирует появление льда на определенную дату, учитывая, что сумма накопленных морозодней составит -161,9 для устья и -38 для истока, что по предварительным расчётам, сделанным ранее, достаточно для появления устойчивого ледового покрова.

Карта вероятности превышения прогностической суммы морозодней установленного предела, после достижения которой появляется лед, показывает вероятность появления льда на определенную дату.

Таким образом, были построены карты вероятности превышения прогностической суммы морозодней для устья (рис. 5.4.1.3), где пределом послужила сумма накопленных морозодней -167, и истока (рис. 5.4.1.4), сумма накопленных морозодней -38

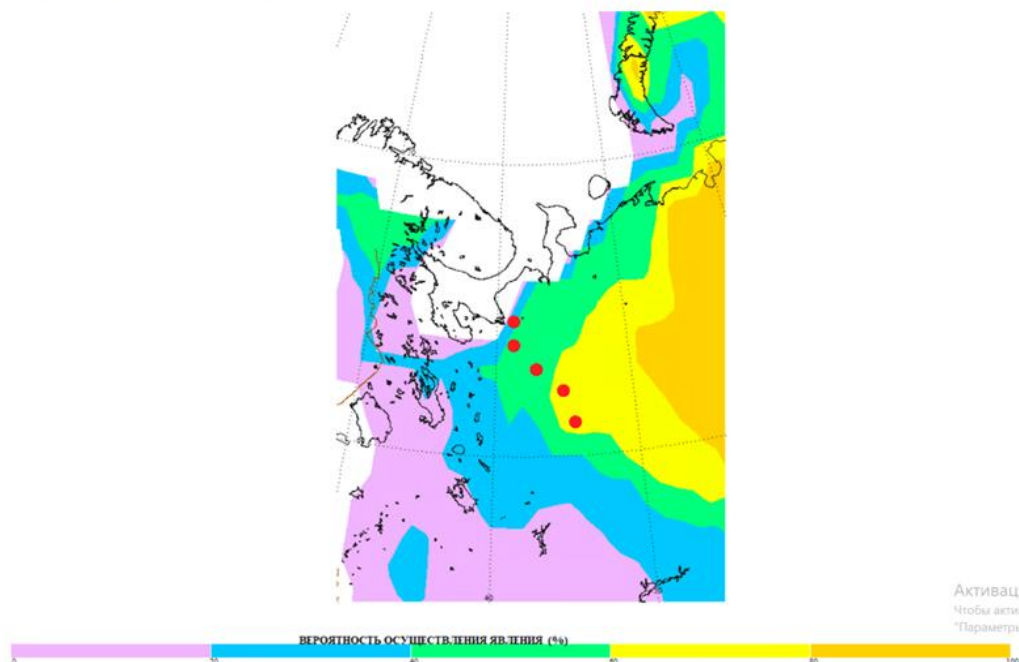


Рис.5.4.1.3 – Карта вероятности превышения суммы морозодней построенная на 8.12. 2020 (дата достижения необходимых сумм морозодней для устья реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по ансамблю)

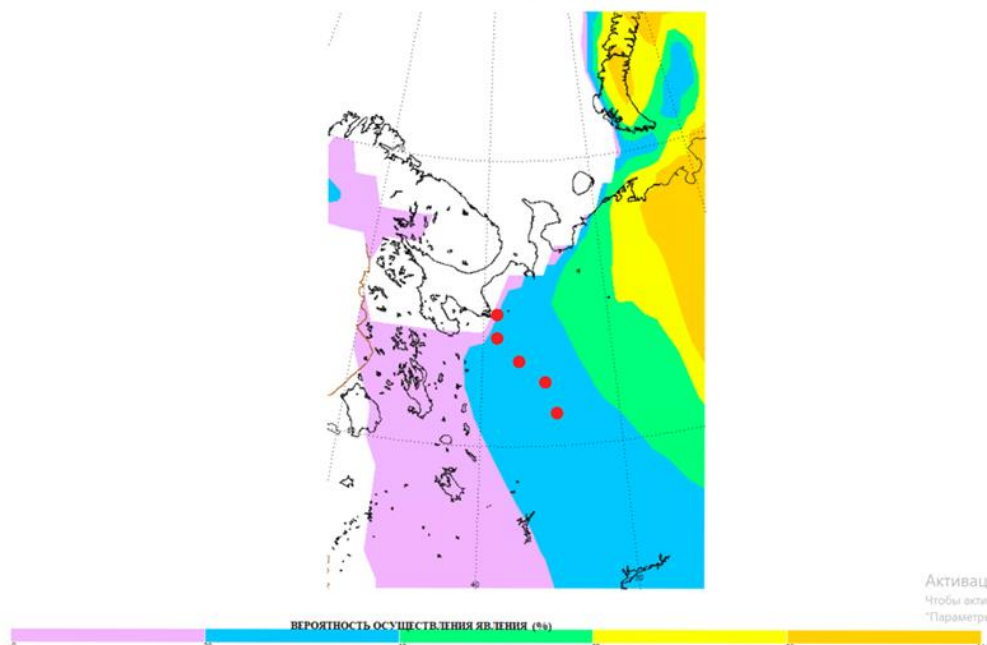


Рис.5.4.1.4 – Карта вероятности превышения суммы морозодней построенная на 15.11. 2020 (дата достижения необходимых сумм морозодней для устья реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по ансамблю)

морозодней для истока реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по ансамблю)

Карты были построены на дату замерзания, спрогнозированную по среднему по ансамблю. Как можно видеть из рис. 5.4.1.3, вероятность установления постоянного ледостава 8 декабря для устья составила от 20 до 60%. То есть из 28 членов ансамбля меньше половины показывают, что сумма морозодней достигнет – 167. Для истока (рис. 5.4.1.4) вероятность установления постоянного ледостава 15 ноября составила от 20 до 40%. Из 28 членов ансамбля около 11 показывают, что сумма морозодней достигнет значения -38.

Также, была отрисована карта среднесуточной суммы морозодней, для подробного анализа географического распределения сумм морозодней на дату прогноза по среднему по ансамблю.

СРЕДНЕСУТОЧНЫЕ СУММЫ МОРОЗОДНЕЙ (НИЖЕ 0), (МОДЕЛЬ NCER CFSv2)

ПЕРИОД: 23 ОКТЯБРЬ - 8 ДЕКАБРЬ

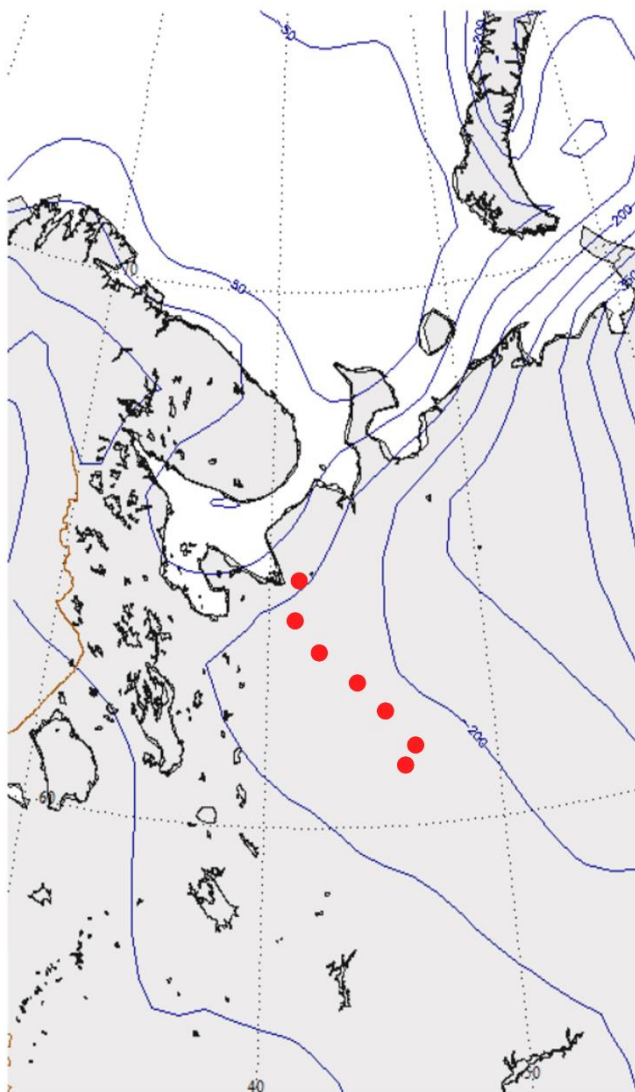


Рисунок 0.4 – Карта географического распределения значений сумм морозодней, построенная на 8.12. 2020 (дата достижения необходимых сумм морозодней для устья реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по ансамблю)

СРЕДНЕСУТОЧНЫЕ СУММЫ МОРОЗОДНЕЙ (НИЖЕ 0), (МОДЕЛЬ NCER CFSv2)

ПЕРИОД: 23 ОКТЯБРЬ - 15 НОЯБРЬ

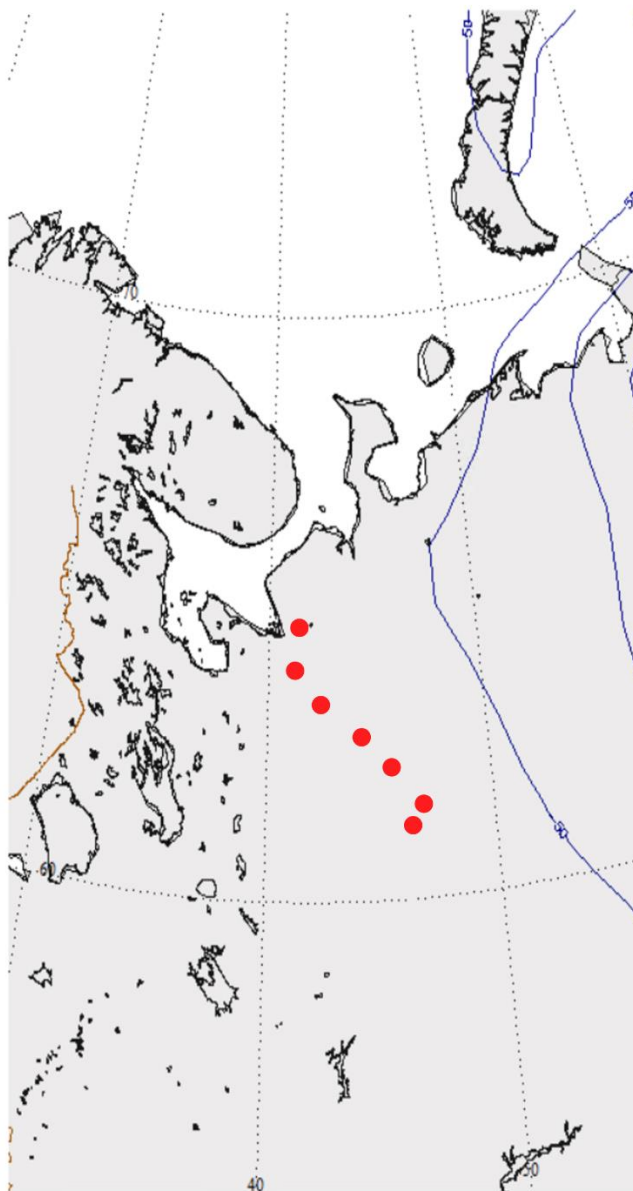


Рис. 5.4.1.5 – Карта географического распределения значений сумм морозодней, построенная на 15.11.2020 (дата достижения необходимых сумм морозодней для истока реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по ансамблю)

По карте среднесуточной суммы морозодней для устья, можно спрогнозировать что 8 декабря вся территория бассейна реки Северная

Двина окажется в зоне достаточных, для замерзания всей реки, морозодней (между изолиниями в -150 и -200). Вероятность появления устойчивого ледостава для истока реки составляет 100 процентов, так как -175 морозодней значительно превышает количество морозодней, необходимого для замерзания этого участка. Для устьевой части реки также можно прогнозировать появление устойчивого ледового покрова.

По карте среднесуточной суммы морозодней для истока, можно спрогнозировать что 15 ноября вероятность появления устойчивого ледостава для истока реки составляет сто процентов, так как изолиния - 50 морозодней располагается достаточно близко, чтобы в истоковой части бассейна реки установилось достаточное для появления ледостава количество морозодней. Вероятность появления ледостава для устья составляет 0 процентов.

5.4.2 Прогноз на 2021

Дата разработки прогноза 27 октября 2021 года. Прогноз составляется на ноябрь-декабрь 2021 года. Для разработки прогноза использовалось 28 членов ансамбля.

Фактическое появление устойчивого льда по данным наблюдений – 10 декабря для гидрологического поста Архангельск (устье) и 15 ноября для гидрологического поста Великий Устюг (исток). Из представленного выше расчета средних морозодней, было установлено, что по фактическим данным, для появления устойчивого ледового покрова необходимо накопление 161.9 морозодней для устья и 38 для истока, и как правило, достижение этих сумм морозодней происходит в ноябре – декабре.

Были построены графики сумм морозодней по данным ансамблевого прогноза для устья и истока (гидрл. пост Архангельск и Великий Устюг, соответственно). Результаты представлены на рис. 5.4.2.1 и 5.4.2.2

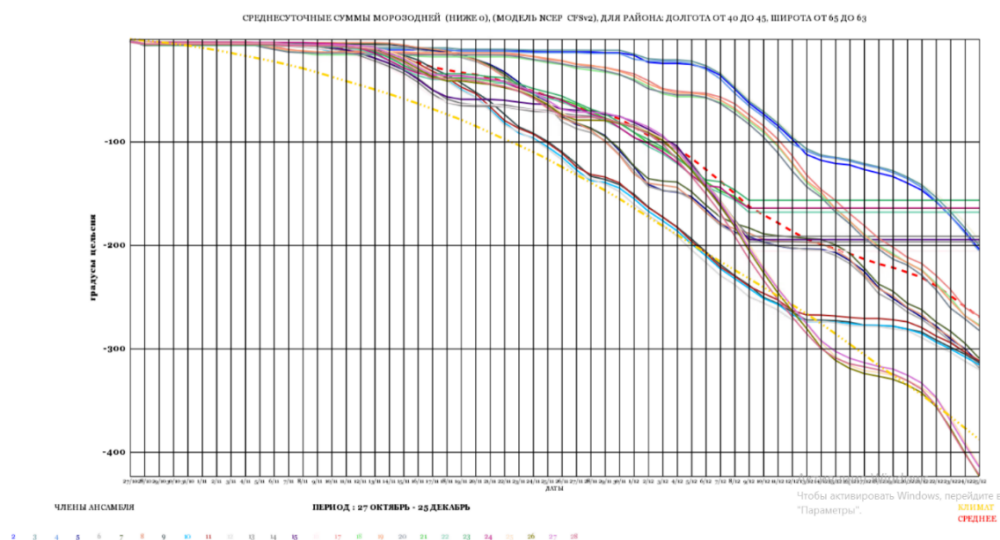


Рис. 5.4.2.1 – График сумм морозодней по данным ансамблевого прогноза для устья реки Северная Двина

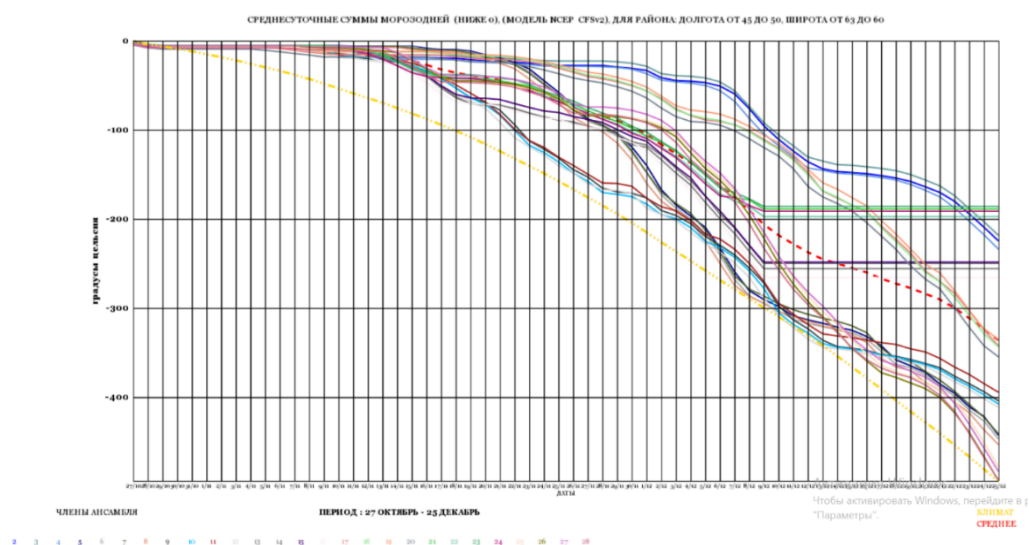


Рис. 5.4.2.2 – График сумм морозодней по данным ансамблевого прогноза для истока реки Северная Двина

Из графика прогностических сумм морозодней для устья видно, что необходимая для замерзания сумма морозодней $-161,9$ градусов по данным среднего по ансамблю, достигается 11 декабря, что значительно позже климатической нормы. Самую раннюю дату замерзания прогнозируют 6 членов ансамбля – 16 ноября. Самая поздняя – 23 декабря – 4 члена ансамбля.

Из графика прогностических сумм морозодней для истока видно, что необходимая для замерзания сумма морозодней -38 градусов по данным среднего по ансамблю, достигается 20 ноября. Самую раннюю дату замерзания прогнозируют 3 члена ансамбля – 15 ноября, самая поздняя – 2 декабря – 3 члена ансамбля.

Исходя из сравнения полученных результатов с фактическими данными, можно сделать вывод, что наиболее достоверными членами ансамбля, которые указывают на фактическую дату появления льда, для устья реки являются 23 и 24 члены, показавшие на 10 декабря сумму морозодней от -155 до -170 .

Для истока такими членами ансамбля являются 5, 24 и 16. Необходимой для замерзания суммы морозодней они достигают 15 ноября, что совпадает с фактической датой замерзания.

Для 2021 года, также были построены карты вероятности превышения прогностической суммы морозодней по среднему по ансамблю, для устья (рис. 5.4.2.3), где пределом послужила сумма накопленных морозодней -165 , и истока (рис. 5.4.2.4), сумма накопленных морозодней -37 .

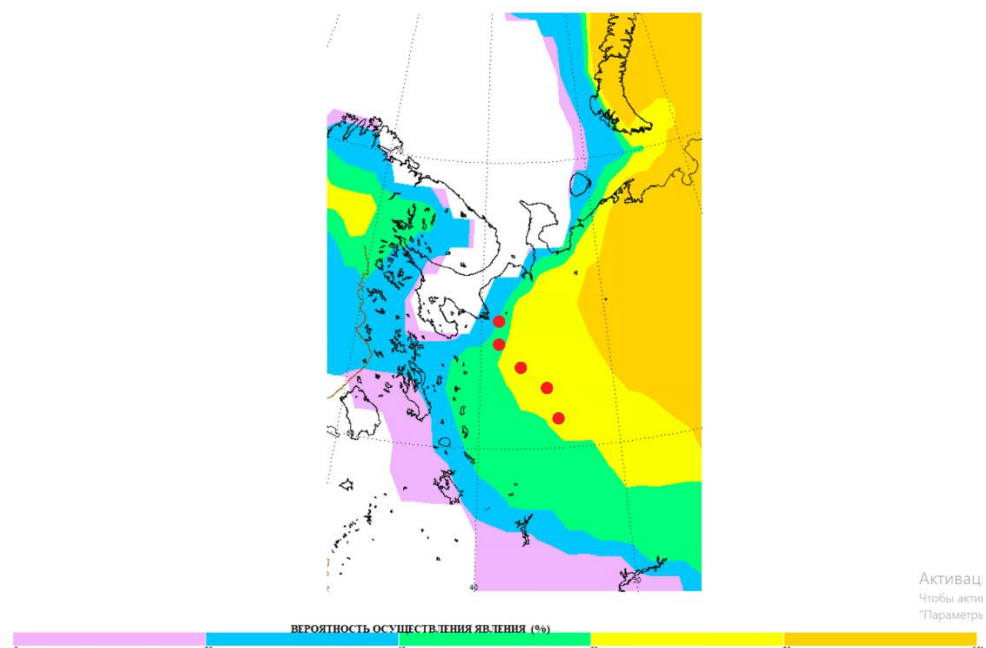


Рис.5.4.2.3 – Карта вероятности превышения суммы морозодней построенная на 11.12. 2021 (дата достижения необходимых сумм морозодней для устья реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по ансамблю)

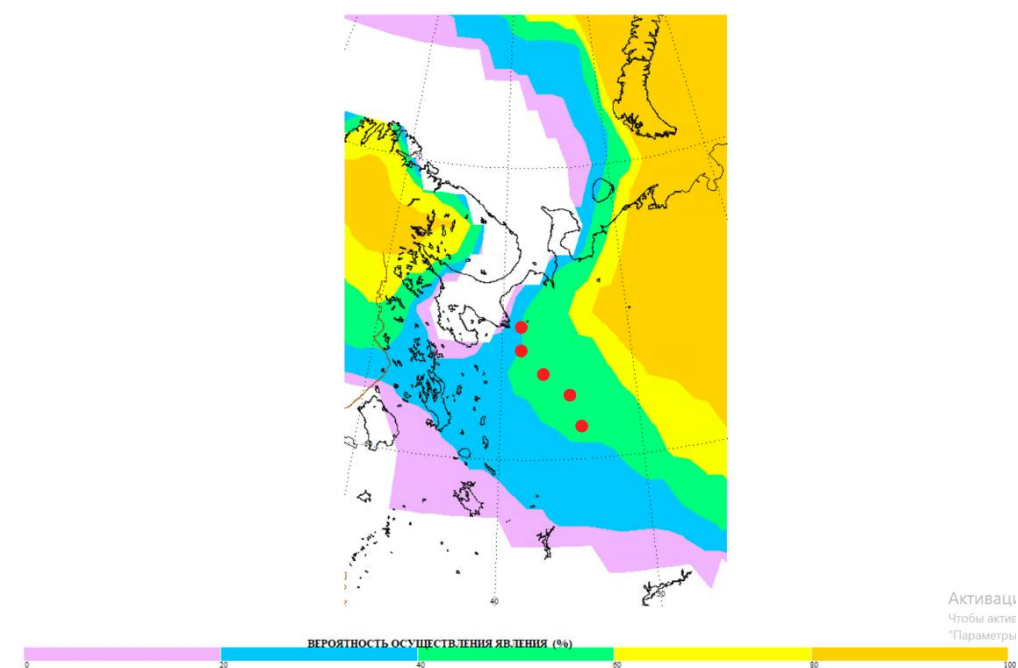


Рис. 5.4.2.4 – Карта вероятности превышения суммы морозодней построенная на 20.11. 2021 (дата достижения необходимых сумм морозодней для истока реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по ансамблю)

Карты были построены на дату замерзания, спрогнозированную по среднему по ансамблю. Как можно видеть из рис. 5.4.2.3, вероятность установления постоянного ледостава 11 декабря для устья составила от 20 до 60%. То есть из 28 членов ансамбля меньше половины показывают, что сумма морозодней достигнет -165 градусов. Для истока (рис. 5.4.2.4) вероятность установления постоянного ледостава 20 ноября составила от 40 до 60%. Из 28 членов ансамбля около половины (17 членов) показывают, что сумма морозодней достигнет значения -37.

Для прогноза на 2021 год также были построены карты географического распределения сумм морозодней для устья (рис. 5.4.2.5) и истока (рис. 5.4.2.6)

СРЕДНЕСУТОЧНЫЕ СУММЫ МОРОЗОДНЕЙ (НИЖЕ 0), (МОДЕЛЬ NSIPP CFSv2)

ПЕРИОД : 27 ОКТЯБРЬ - 11 ДЕКАБРЬ

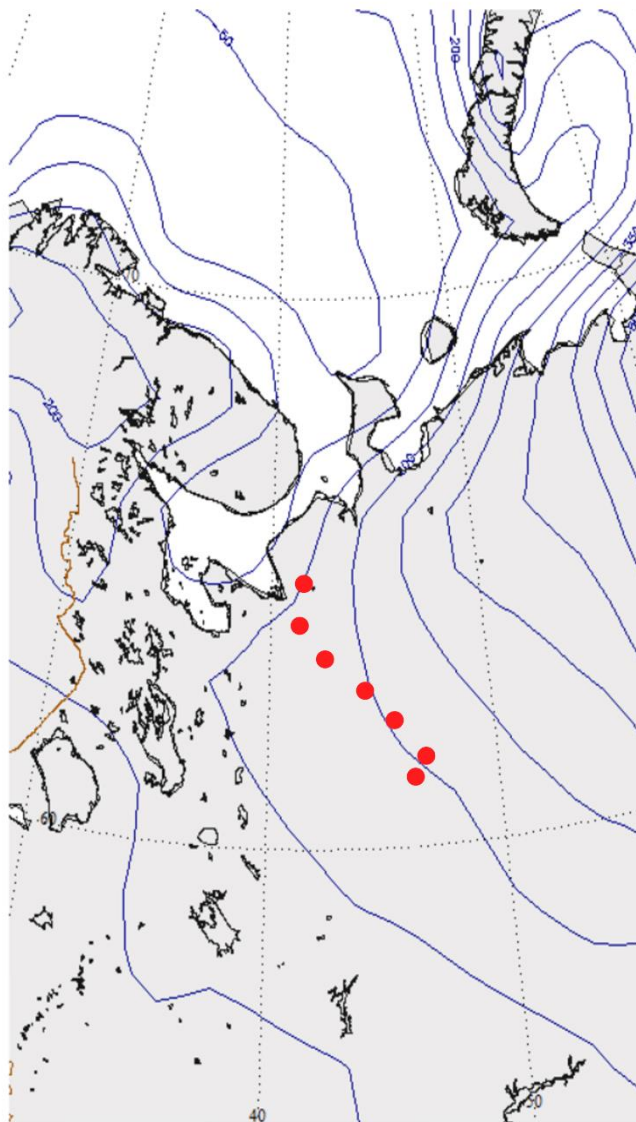


Рис. 5.4.2.5 – Карта географического распределения значений сумм морозодней, построенная на 11.12. 2021 (дата достижения необходимых сумм морозодней для устья реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по ансамблю)

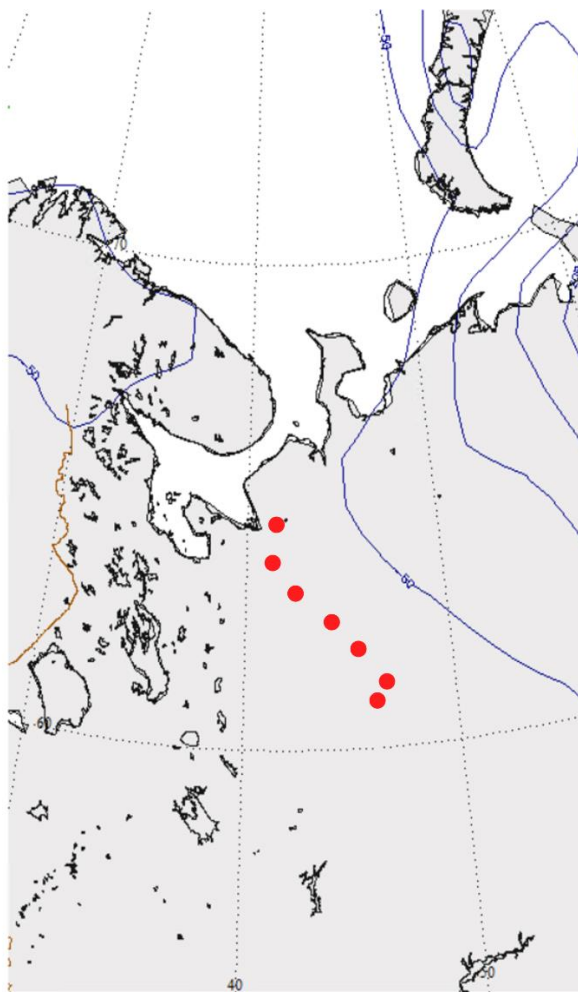


Рис. 5.4.2.6 – Карта географического распределения значений сумм морозодней, построенная на 20.11. 2021 (дата достижения необходимых сумм морозодней для истока реки Северная Двина по прогнозу, основанному на среднем по ансамблю)

По карте среднесуточной суммы морозодней для устья, можно спрогнозировать что 11 декабря большая часть территории бассейна реки Северная Двина окажется в зоне достаточных, для замерзания всей реки, морозодней (между изолиниями в -150 и -200). Вероятность появления устойчивого ледостава для истока реки составляет 100 процентов, так как -200 морозодней значительно превышает количество морозодней, необходимого для замерзания этого участка.

Для устьевой части реки также можно прогнозировать появление устойчивого ледового покрова.

По карте среднесуточной суммы морозодней для истока, можно спрогнозировать что 20 ноября вероятность появления устойчивого ледостава для истока реки составляет сто процентов, так как изолиния - 50 морозодней располагается достаточно близко, чтобы в истоковой части бассейна реки установилось достаточное для появления ледостава количество морозодней. Вероятность появления ледостава для устья составляет 0 процентов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была рассмотрена возможность разработки долгосрочного прогноза появления устойчивого ледостава для реки Северная Двина

Было установлено следующее:

- Данные реанализа температуры на 2 метрах, разрабатываемых по модели GFS с шагом сетки 1x1 градус хорошо коррелируют с данными наблюдений. Статистический анализ установил, что существует сильная корреляционная связь между температурой на гидрологических постах Архангельск и Великий Устюг и данными реанализа. Для устья реки она составила +0,9, для истока - +0,7.
- Данные реанализа подходят для расчета средних сумм морозодней для устья реки Северная Двина - разница между средними накопленными температурами к моменту установления ледостава по фактическим данным и данным реанализа составила 8,9 градусов. Однако, использование данных реанализа для расчета средних сумм морозодней для истока является некорректным – при сравнении средних накопленных отрицательных температур, была выявлена значительная разница между морозоднями по фактическим данным и данным реанализа. Она составила 161 градус.

Прогноз по синоптическому методу с использованием лет гомологов как членов ансамбля показал следующие результаты:

- 1) Средняя ошибка прогноза по ансамблю лет-гомологов составляет для устья 14 дней и 29 дней для истока после уточнения прогноза по картам географического распределения сумм морозодней

3) Ошибка прогноза для устья меньше, чем для истока. Минимальная ошибка составила 0 дней для поста Архангельск и 12 дней – для Великого Устюга.

2) В годы с наибольшей ошибкой прогноза (2008, 2015, 2018 для устья и 2008, 2009, 2011, 2012 и 2017 для истока), максимально составившей 44 дня для обоих участков реки, по данным о ледовых явлениях, полученных с гидрологических постов, наблюдалось неустойчивое, аномально раннее/позднее замерзание, обусловленное сложными синоптическими и гидрологическими условиями, когда установление и сход льда происходил неоднократно.

4) Важно отметить, что при исключении лет с экстремальными условиями замерзания, приводившими к неустойчивому замерзанию, средняя ошибка прогноза сокращается, и составляет 10 дней для устья и 13 дней для истока

3) Прогноз может быть использован для построения карт среднесуточных сумм морозодней для прогноза географического распределения областей устойчивого ледостава. В данной работе построенная прогностическая карта географического распределения сумм морозодней показала результат близкий к фактическому при сравнении карт льда с данными о фактическом замерзании

6) Для того, чтобы предложенный подход был статистически значим, необходимо проводить дальнейшую серию экспериментов с проверкой прогнозов на историческом материале.

Долгосрочный прогноз по численной модели NCEP CFS v2 методом ансамблей на зимы 2020-2021 и 2021-2022 с заблаговременностью 1-2 месяца показал следующее:

1) Прогноз дат появления ледостава, рассчитанный по суммам морозодней рассчитанный как среднее по всему ансамблю, показал совпадение их с данными наблюдений с погрешностью 9 дней для устья и 5 дней для истока на 2020-2021. На зимний период 2021-2022 ошибка прогноза составила 1 день для устья и 5 дней для истока.

-для 2020-2021 года, из 28 членов ансамбля, прогноз для устья по 4 членам ансамбля оказался наиболее близким к фактической дате замерзания. Ошибка прогноза составила всего 2 дня. Для истока из 28 членов ансамбля прогноз по 3 членам ансамбля оказался наиболее приближен к фактической дате замерзания. Ошибка прогноза также составила 2 дня.

-для 2021-2022 года, из 28 членов ансамбля, прогноз для устья по 2 членам ансамбля оказался наиболее близким к фактической дате замерзания. Ошибка прогноза составила 1 день. Для истока, из 28 членов ансамбля прогноз по 3 членам ансамбля оказался наиболее приближен к фактической дате замерзания. Ошибка прогноза составила 0 дней.

2) Карты вероятности превышения критической суммы морозодней показали следующее:

Для 2020-2021 года, вероятность появления ледостава на 8 декабря в устье реки Северная Двина составляет 40-60%. То есть, из 28 членов ансамбля половина показала, что сумма морозодней достигнет -161 градус.

Вероятность появления ледостава на 15 ноября в истоке реки Северная Двина составляет 20-40%, то есть треть членов ансамбля из 28 показала, что сумма морозодней достигнет -38 градусов.)

Для 2021-2022 года, вероятность появления ледостава на 11 декабря в устье реки Северная Двина составляет 20-60%. То есть, из 28 членов ансамбля около половины показали, что сумма морозодней достигнет -161 градус.

Вероятность появления ледостава на 20 ноября в истоке реки Северная Двина составляет 40-60%, то есть половина членов ансамбля из 28 показала, что сумма морозодней достигнет -38 градусов.

3) Карты среднесуточных сумм морозодней показали:

Для 2020-2021 года можно спрогнозировать что 8 декабря вся территория бассейна реки Северная Двина окажется в зоне достаточных, для замерзания всей реки, сумм морозодней (между изолиниями в -150 и -200). Вероятность появления устойчивого ледостава для истока реки составляет 100 процентов, так как -175 морозодней значительно превышает количество морозодней, необходимого для замерзания этого участка. Для устьевой части реки также можно прогнозировать появление устойчивого ледового покрова.

По карте среднесуточных сумм морозодней для истока, можно спрогнозировать что 15 ноября вероятность появления устойчивого ледостава для истока реки составляет сто процентов, так как изолиния -50 морозодней располагается достаточно близко, чтобы в истоковой части бассейна реки установилось достаточное для появления ледостава количество морозодней. Вероятность появления ледостава для устья составляет 0 процентов.

Для 2021-2022 года можно спрогнозировать что 11 декабря большая часть территории бассейна реки Северная Двина окажется в зоне достаточных, для замерзания всей реки, морозодней (между изолиниями в -150 и -200). Вероятность появления устойчивого ледостава для истока реки составляет 100 процентов, так как -200

морозодней значительно превышает количество морозодней, необходимого для замерзания этого участка. Для устьевой части реки также можно прогнозировать появление устойчивого ледового покрова.

По карте среднесуточной суммы морозодней для истока, можно спрогнозировать что 20 ноября вероятность появления устойчивого ледостава для истока реки составляет сто процентов, так как изолиния - 50 морозодней располагается достаточно близко, чтобы в истоковой части бассейна реки установилось достаточное для появления ледостава количество морозодней. Вероятность появления ледостава для устья составляет 0 процентов

Предложенный мною прогностический подход, в двух рассмотренных в данной работе случаях, показал хорошую достоверность. Но для того, чтобы предложенный подход был статистически значим, необходимо проводить дальнейшую серию экспериментов с проверкой прогнозов на историческом материале.

В предложенных методах прогноза пока не учитывались другие факторы, влияющие на ледообразование. Важно исследовать относительную роль всех факторов ледообразования с учетом местных условий и сезона года, что является сложной и трудоемкой задачей и требует дальнейших исследований.

7. Список литературы

1. Гинзбург Б.М., Сильницкая М.И. Влияние распределения температуры поверхности океанов на сроки вскрытия рек европейской территории России. - Метеорология и гидрология , 2000, №6, с 86- 91
2. Георгиевский Ю. М. Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озерах и водохранилищах. Учебное пособие. – Л., Изд. ЛПИ, 1986, с. 50.
3. Борщ С.В., Гинзбург Б.М., Ефремова Н.Д. Долгосрочный фоновый прогноз сроков вскрытия рек европейской территории СНГ.- Метеорология и гидрология, 2001, № 7, с.101-110.
4. Глаголева М.Г., Скриптунова Л.И., Большакова Е.В. Физико-статистический метод прогноза аномалии температуры воды в северной части Атлантического океана. Труды Гидрометцентра СССР, 1988, вып.292, с.181-190.
5. Гинзбург Б.М. Влияние температуры поверхности океанов на сроки замерзания и вскрытия рек. Методы его учета в прогнозах. С-Пб., Гидрометеиздат, 2005, 100с.
6. Савченкова Е.И. Опыт исследования связей появления плавучего льда на некоторых реках СССР с особенностями циркуляции атмосферы Северного полушария. Труды Гидрометцентра СССР, 1970, вып.67, с.3-36.
7. Савченкова Е.И., Каракаш Е.С., Ефремова Н.Д., Антипова Е.Г. Современные принципы разработки методов долгосрочного прогноза замерзания и вскрытия рек. Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда, том 7, с.273-279.
8. Подсечина Т.В. Нарастание льда на волжских водохранилищах и его зависимость от атмосферных процессов. Труды Гидрометцентра СССР, 1987, вып.295, с.140-157.

9. Руководящие указания по системам ансамблевого прогнозирования и прогнозированию. Всемирная метеорологическая организация. [Текст]: Дос. ВМО-№ 1091- 2012. - М.: Издание, 2012. - 29 с.
10. Цепелев В.Ю. Лекции по долгосрочным прогнозам погоды, - РГГМУ
11. Агафонова С.А. Ледовый режим рек севера Европейской территории России и его влияние на гидроэкологическую безопасность территории: кандидат географических наук – Москва, 2009 – 205 с.
12. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Эстерле Г.Р. Схема адаптивного статистического прогноза с использованием группы аналогов. - Труды ВНИИГМИ-МЦД, 1976, вып. 13, с. 5-25
13. Цепелев В.Ю., Хан В.М. Ансамблевый подход при составлении долгосрочных метеорологических прогнозов, разработанных синоптическими методами. Сборник трудов Международной научной конференции Исследование изменений климата с использованием методов классификации режимов циркуляции атмосферы. / Отв. ред. В.А Семенов, Н.К. Кононова. Российская академия наук, институт географии, Русское географическое общество, Московское городское отделение, Комиссия метеорологии и климатологии. 16-18 мая 2016 г., ISBN 978-5-89658-044-7, УДК 551.509.331., стр. 53-57.]
14. В.Ю. Цепелев, В.М. Хан. Вероятностное представление долгосрочных метеорологических прогнозов, разработанных синоптическими методами. Метеорология и гидрология. 2014, №4. С.17-31. **ISSN:** 1068-3739 Digital Object Identifier (DOI) 10.3103/S1068373915040020].