

Мизяк Василий Геннадьевич

АНСАМБЛЕВАЯ СИСТЕМА УСВОЕНИЯ ДАННЫХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ВЕТРА

Специальность 1.6.18 –
Науки об атмосфере и климате

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», в отделе Прогностических технологий ММЦ Москва, Лаборатория глобальных прогнозов

Научный руководитель: проф., д.ф.-м.н.
Толстых Михаил Андреевич

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н. Пененко Алексей Владимирович,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки «Институт вычислительной математики и
математической геофизики СО РАН»

к.г.н. А.Л. Ветров, Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего
образования «Пермский государственный национальный
исследовательский университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Защита состоится «17» декабря 2024 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета 26.1.002.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123376, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте <https://meteoinfo.ru/disserboard>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Учёный секретарь Диссертационного
совета, кандидат физико-математических
наук



М.В. Шатунова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Гидрометцентр России в статусе Мирового метеорологического центра обязан предоставлять для международного обмена прогностической информацией продукцию ансамблевого среднесрочного прогноза, с количеством участников ансамбля в несколько десятков. Подобный прогноз является источником информации о вероятности тех или иных явлений погоды, позволяет уточнить детерминистический среднесрочный прогноз и оценить его надёжность.

Система ансамблевого прогноза включает генерацию набора (ансамбля) начальных данных, адекватно описывающего их неопределенность, а также прогностическую модель атмосферы. Увеличение размера ансамбля улучшает вероятностные оценки ансамблевых прогнозов. Ранее применявшаяся в Гидрометцентре России система генерации начальных данных для ансамблевого прогноза на основе бридинга характеризовалась насыщением, когда увеличение размера ансамбля свыше 20 членов уже не улучшало характеристики ансамблевого прогноза. Для генерации ансамбля наборов начальных данных с размером ансамбля в несколько десятков естественно использовать систему усвоения данных наблюдений ансамблевого типа. Локальный ансамблевый фильтр Калмана с преобразованием ансамбля представляет собой легко реализуемый алгоритм ансамблевого усвоения. Одним из немногих видов данных спутниковых наблюдений, которые могут быть легко использованы в этом алгоритме и способны повысить точность генерируемых начальных данных, являются спутниковые наблюдения ветра.

Целью диссертационной работы является разработка системы ансамблевого усвоения данных, использующей контактные наблюдения за состоянием атмосферы и спутниковые наблюдения ветра, и применение этой системы для ансамблевого среднесрочного прогноза погоды.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать и применить методику настройки ансамблевой системы усвоения, позволяющую уменьшить ошибку вектора состояния системы.
2. Исследовать свойства ошибок спутниковых наблюдений ветра, разработать методику их учёта для использования в ансамблевой системе усвоения данных.
3. Разработать и испытать систему ансамблевого среднесрочного прогноза погоды, основанную на ансамблевой системе усвоения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика настройки ансамблевой системы усвоения позволяет уменьшить ошибку и управлять разбросом ансамбля начальных данных, уменьшая ошибку ансамблевого прогноза погоды.
2. Использование схемы переопределения высоты наблюдений и учёт корреляций ошибок наблюдений спутниковых наблюдений ветра AMV (Atmospheric Motion Vectors) повышает точность начальных данных для численных прогнозов погоды.
3. Разработанная при участии автора система усвоения позволила реализовать и внедрить новую систему ансамблевого среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России.

Научная новизна:

1. Впервые в России спутниковые данные ветра AMV использованы в ансамблевой системе усвоения данных.
2. Впервые в России применено моделирование ковариаций ошибок наблюдений в усвоении данных в метеорологии.
3. Выполнено новое исследование влияния свойств ошибок спутниковых наблюдений ветра на точность среднесрочного прогноза погоды.

Теоретическая значимость. Предложена методика настройки, позволяющая повысить точность результатов ансамблевой системы усвоения. Разработана схема учёта корреляции ошибок спутниковых наблюдений ветра в зависимости от типа спутника, его географического положения и каналов получения данных.

Практическая значимость. Разработана и реализована ансамблевая система усвоения данных с использованием информации о ветре, полученной из спутниковых наблюдений. Усвоение спутниковых данных о ветре позволяет улучшить оценку начального состояния атмосферы, что, в свою очередь, повышает точность численных прогнозов. Ансамблевая система усвоения использована в системе ансамблевого среднесрочного прогноза погоды, которая прошла испытания и внедрена в оперативную практику в Гидрометцентре России.

Достоверность полученных результатов обеспечивается результатами проведённых численных экспериментов и их сравнением с данными метеорологических наблюдений и оперативного анализа Гидрометцентра России. Приведённые в диссертационной работе результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались автором на следующих конференциях:

1. Международная суперкомпьютерная конференция «Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений», п. Абрау-Дюрсо, Краснодарский край, 17–22 сентября 2012 г.;
2. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: «CITES-2015», г. Томск, 20–30 июня 2015 г.;
3. Школа-семинар «Современные методы дистанционных исследований и прогноза параметров среды в Арктике», г. Таруса, Калужская обл., 12–14 октября 2015 г.;
4. Международная научная конференция «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2015» (АПВППМ-2015), г. Новосибирск, Академгородок, 19–23 октября 2015 г.;
5. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: «CITES-2017», г. Таруса, г. Звенигород, 28 августа – 7 сентября 2017 г.;
6. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: «CITES-2019», г. Москва, 27 мая – 6 июня 2019 г.;
7. International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, October 12–16, 2020, Moscow, Russia;

8. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: «CITES-2021», г. Москва, 22–27 ноября 2021 г.;

9. Международная конференция и школа молодых учёных по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: «ENVIROMIS-2022», г. Томск, 12–17 сентября 2022 г.;

10. IV Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова, г. Москва, 22–24 ноября, 2022 г.;

11. Международная конференция «Марчуковские научные чтения 2024», г. Новосибирск, 7–11 октября 2024 г.

Кроме того, автором были сделаны доклады по теме диссертационной работы на семинарах в ИВМ РАН и в Гидрометцентре России.

Личный вклад. Автор принимал участие в разработке ансамблевой системы усвоения, его наиболее значимый личный вклад был внесён на этапе программной реализации параллельного алгоритма усвоения с помощью гибридной технологии MPI+OpenMP. Лично автором были выполнены следующие работы:

- разработка и внедрение системы верификации прогнозов, сделанных на основе начальной оценки состояния атмосферы, полученных с помощью разработанной системы усвоения;
- исследование влияния свойств ошибок спутниковых наблюдений ветра AMV на точность получаемых результатов;
- разработка схемы переопределения высоты наблюдений AMV;
- разработка схемы использования коррелированных ошибок в локальном наборе данных наблюдений AMV;
- разработка методики настройки параметров схемы аддитивной инфляции в ансамблевой системе усвоения;
- разработка общего алгоритма и практическая реализация системы среднесрочного ансамблевого прогноза, в т.ч. системы ансамблевой верификации.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 статьях, 4 из которых опубликованы в журналах, входящих в список ВАК. Кроме того, соискатель является соавтором 18 прочих статей, 2 монографий, 9 тезисов докладов. Получено 3 свидетельства Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ. Имеется акт № 1 ЦМКП/2022/ от 26.12.2022 г. о внедрении технологии ансамблевого прогноза метеорологических полей с заблаговременностью до 10 суток на основе результатов настоящей диссертационной работы.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и пяти приложений. Полный объём диссертации составляет 139 страниц с 40 рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит 144 наименования.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы её цели и задачи, аргументирована новизна исследований, показаны практическая и научная значимость работы, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **главе 1** приводится обзор литературы, в котором усвоение данных охарактеризовано как важное направление в области численного моделирования прогноза погоды для обеспечения модели начальными данными. Результатом работы алгоритмов усвоения данных является наилучшая возможная оценка состояния атмосферы. Источниками получения такой информации являются краткосрочный прогноз на регулярной сетке и данные метеонаблюдений в произвольных точках. Обращается внимание на необходимость оценки статистических характеристик этих источников, в первую очередь их ковариационных матриц. Постановка задачи усвоения данных приводится в **разделе 1.1**.

Наиболее часто применяемые методы решения задачи рассмотрены в **разделе 1.2**. В настоящее время сформировалось два основных подхода к решению задачи усвоения данных. Вариационный подход даёт наилучшие результаты в своей четырёхмерной разновидности [Courtier et al., 1994], но требует разработки сложной линейно-касательной прогностической модели. Кроме того, вариационные подходы хуже используют современные возможности массивно-параллельных вычислительных комплексов.

Различные схемы ансамблевых фильтров Калмана легче реализуемы и при этом несколько превосходят результаты использования трёхмерных вариационных схем. Одним из достоинств схем усвоения, основанных на фильтре Калмана, является обновляемая на каждом шаге усвоения матрица ковариаций ошибок первого приближения, учитывающая текущее состояние атмосферы. Применяемая в данной работе система усвоения [Shlyayeva et al., 2013] основана на алгоритме, который носит название Локальный ансамблевый фильтр Калмана с преобразованием ансамбля (Local Ensemble Transform Kalman Filter, LETKF). Алгоритм LETKF впервые был описан в работе [Hunt et al., 2007]. Основным преимуществом алгоритма LETKF является высокая степень распараллеливания по данным, которая возможна ввиду того, что данные наблюдений усваиваются локально для каждой точки модельной сетки. Эффективное распараллеливание алгоритма позволяет компенсировать всё больший объём обрабатываемых данных большим количеством процессорных ядер и высокой производительностью вычислительной системы, которые также постоянно увеличиваются. Важным свойством алгоритма является возможность использования ансамбля начальных состояний, получаемого в ходе его применения, для расчета ансамблевых прогнозов погоды.

Данные метеорологических наблюдений, которым посвящён **раздел 1.3**, являются очень важной частью всех систем усвоения, вокруг которой и построены все алгоритмы и методы получения оптимальной оценки состояния атмосферы в точках модельной сетки. Современные массивы данных наблюдений имеют очень большие размеры. При этом их количество продолжает расти, т. к. изобретаются новые инструменты, позволяющие получить актуальные данные о характеристиках состояния атмосферы. На сегодняшний день в каждый срок анализа с учётом спутниковой информации доступны данные порядка 10^{12} – 10^{14} наблюдений.

Существенное влияние на результат усвоения с помощью LETKF оказывает локализация наблюдений. При этом для увеличения точности результатов необходимо применять инфляцию матриц ковариаций ошибок первого приближения и наблюдений.

Большую сложность представляет усвоение данных спутникового зондирования ввиду нетривиального перевода измеряемых величин в модельное пространство и обратно, а также наличия автокорреляций ошибок наблюдений. При этом спутниковые наблюдения ветра AMV, которым уделено особое внимание в данной работе и в разработанной системе усвоения данных, локализованы в физическом пространстве, поэтому легко могут быть использованы в применяемом нами алгоритме LETKF.

В разделе 1.4 описаны данные наблюдений ветра AMV, которые являются одним из видов спутниковых наблюдений, позволяющим восполнить недостаток информации от сетей традиционных контактных метеорологических наблюдений. Они содержат данные о ветре, основанные на отслеживании облаков жидкой и кристаллической фазы, а также водяного пара на спутниковых изображениях. Эти наблюдения имеют высокое временное разрешение, обеспечивая при этом глобальное покрытие, в т.ч. и в арктических широтах. Последнее крайне важно ввиду малого количества данных контактных и дистанционных наблюдений за состоянием атмосферы в высоких широтах. В проводимых ранее исследованиях влияния различных видов наблюдений на точность численных прогнозов погоды [Cardinali et al. 2009; English et al, 2013; Eyre et al, 2016] было выявлено, что наблюдения AMV вносят заметный, хотя и не решающий вклад в повышение точности анализов и прогнозов.

Глава 2 посвящена разработанной ансамблевой системе усвоения, состав которой приводится в разделе 2.1. В системе используются следующие виды наблюдений:

- радиозондовые наблюдения TEMP (температура, относительная влажность и компоненты скорости ветра на 16 стандартных уровнях от 1000 гПа до 10 гПа, около 650 наблюдений на каждом уровне два раза в сутки);
- наземные и корабельные наблюдения SYNOP, SHIP (приземное давление, температура и относительная влажность на уровне 2 м, порядка 10000 наблюдений 4 раза в сутки);
- самолетные наблюдения AIREP (температура и компоненты скорости ветра, порядка 10000 наблюдений);
- спутниковые наблюдения ветра AMV (компоненты скорости ветра, до 800000 наблюдений в день);
- скаттерометрические наблюдения рассеянной радиации ASCAT (составляющие скорости ветра над водными поверхностями, до 200000 наблюдений в день).

Разработанная система усвоения использует гибридное распараллеливание с применением технологий MPI и OpenMP, что позволяет эффективно запускать реализующую алгоритм программу на большом количестве вычислительных ядер массивно-параллельных ЭВМ. Поля имеют постоянное горизонтальное разрешение по пространству $0.9^\circ \times 0.72^\circ$ с 96 вертикальными гибридными уровнями или 28 вертикальными сигма-уровнями. В состав ансамбля входят 40 участников.

В качестве первого приближения описываемая система усвоения использует прогнозы глобальной модели атмосферы ПЛАВ (от ПолуЛагранжева, основанная на уравнении

Абсолютной заВихренности, в английском варианте – SL-AV) [Толстых и др., 2017; Толстых и др., 2018], описание которой приводится в **разделе 2.2**.

Раздел 2.3 посвящён описанию настройки параметров матрицы ковариаций ошибок наблюдений. Для всех участвующих в усвоении видов наблюдений при разработке системы усвоения и её первоначальной настройке использовался диагональный вид матрицы ковариаций ошибок наблюдений, т. е. возможные автокорреляции между составляющими вектора наблюдений y^o не учитывались на начальном этапе.

Подбор диагональных элементов производился в ходе многочисленных экспериментов на начальных стадиях разработки описываемой ансамблевой системы усвоения А.В. Шляевой (для наблюдений метеозондов, приземных станций и наблюдений с самолётов), В.С. Роговым (для спутниковых наблюдений ASCAT) и автором представленной диссертационной работы (для спутниковых наблюдений ветра AMV). Первоначальные значения ковариаций были заимствованы из работы [Hernandez-Carrascal et al., 2012].

Для исключения ложной информации, поступающей из данных наблюдений, необходимо применять контроль качества наблюдений, способы которого описываются в **разделе 2.4**. Так, в усвоении не участвуют наблюдения с отрицательной абсолютной температурой, заведомо низким давлением (ниже 800 гПа для корабельных или наземных наблюдений на высоте уровня моря или немного выше) и т.д. В случае, если отклонение наблюдаемого значения от значения первого приближения превышает 5 стандартных отклонений, наблюдение исключается и в дальнейшем в усвоении не участвует.

В **разделе 2.5** описана локализация наблюдений вокруг точек модельной сетки. В данной работе наблюдения локализуются в цилиндрической области, внутри которой оно оказывает влияние на значение получаемого анализа. Высота и радиус этого цилиндра подбираются эмпирическим путём. Влияние наблюдения уменьшается с увеличением расстояния от рассматриваемой точки анализа. Высота цилиндра (т. е. величина радиуса локализации по вертикали) зависит от предполагаемого влияния наблюдений на анализ в точках, расположенных на соседних вертикальных уровнях. Вертикальная локализация осуществляется в терминах логарифма давления. Величина горизонтальных и вертикальных радиусов локализаций варьируется в зависимости от составляющей вектора анализа, вида наблюдений, вертикального уровня и географических координат рассматриваемой точки.

Раздел 2.6 посвящён описанию инфляции матрицы ковариаций ошибок первого приближения, позволяющей избежать переоценки точности первого приближения при вычислении анализа. Инфляция может быть реализована во время работы модели (физическая) и во время работы усвоения (статистическая). Физическая инфляция реализована с помощью возмущений параметров и тенденций параметризаций неадиабатических процессов подсеточного масштаба для разных участников ансамбля [Alipova et. al., 2022]. Реализация статистической инфляции производится путём внедрения в систему усвоения мультипликативной и аддитивной инфляций.

Параметр мультипликативной инфляции в предлагаемой реализации может быть задан как функция вертикального уровня и широты. Аддитивная инфляция реализована путём добавления к полям случайного шума. Для подбора величин параметров, оказывающих влияние на аддитивную инфляцию, автором представленной работы были проведены

многочисленные эксперименты. Параметры амплитуды случайного шума, реализующего механизм аддитивной инфляции в ансамблевой системе усвоения, подбирались таким образом, чтобы разброс ансамбля максимально совпадал со среднеквадратической ошибкой прогноза с заблаговременностью 24 и 48 часов.

Пример результата применения и настройки инфляции приведён на рисунке 1, где представлены осреднённые за июнь 2023 года зависимости среднеквадратических ошибок (СКО) и разбросов для давления на уровне моря во внетропической части Северного полушария до и после применения оптимальных значений параметров амплитуды аддитивной инфляции.

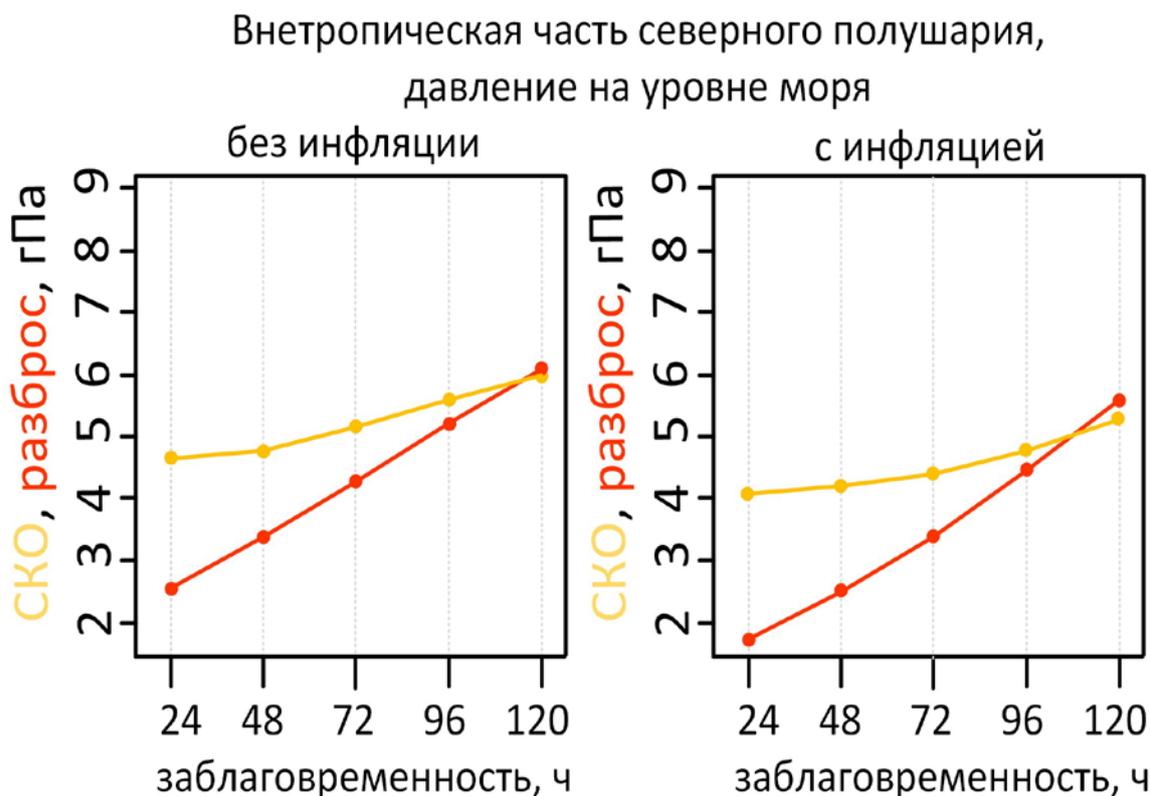


Рис. 1 – Зависимость осреднённых за июнь 2023 года среднеквадратических ошибок (оранжевый цвет) и разбросов по ансамблю (красный цвет) значений давления на уровне моря от заблаговременности прогноза до (слева) и после (справа) применения инфляции.

Регион – внетропическая часть Северного полушария

В разделе 2.7 описана текущая реализация фильтра, использующая библиотеки параллельного программирования для запуска на массивно-параллельных вычислительных кластерах. Вычисления в фильтре выполняются в режиме гибридного распараллеливания с помощью технологий MPI и OpenMP. Широтные полосы обрабатываются MPI-процессами, что ограничивает возможное количество используемых MPI-процессов разрешением сетки по широте. Внутри каждой широтной полосы используется равномерное разбиение расчётной области на долготные части, количество которых определяется количеством заданных OpenMP нитей.

Описание задания почвенных переменных и запуска полного комплекса программ системы усвоения приведено в разделах 2.8 и 2.9 соответственно.

Результаты работ, проведённых в рамках данной главы, опубликованы в статье [Shlyueva et. al., 2013].

В **главе 3** приводится описание усвоения спутниковых наблюдений ветра AMV в рамках описываемой системы усвоения. Эксперименты по включению этих наблюдений в число усваиваемых помогли внести ряд улучшений, которые позволяют использовать описываемую систему усвоения для подготовки начальных данных в оперативной системе ансамблевого прогноза Гидрометцентра России. Содержание разделов, вошедших в главу 3, опубликовано в работах [Мизяк и др., 2016; Мизяк и др., 2023].

В **разделе 3.1** приводится описание системы усвоения и её параметров, использованных в численных экспериментах по циклическому усвоению с шагом 6 часов. В экспериментах использовались данные указанных выше наблюдений. Отдельно усваивались значения температуры и относительной влажности на уровне 2 м, а также информация о приземном давлении, температуре и составляющих ветра на вертикальных гибридных уровнях модели. Использование инкрементов анализа температуры и относительной влажности на уровне 2 м проводилось для анализа почвенных переменных аналогично [Богословский и др., 2008].

Оценка эффективности применяемых изменений, описание которой приводится в **разделе 3.2**, проводилась с использованием оперативной технологии расчёта ошибок детерминированных среднесрочных прогнозов в соответствии со стандартами Всемирной метеорологической организации.

Раздел 3.3 посвящен описанию аспектов включения данных наблюдений AMV в число усваиваемых. Доступные наблюдения поделены на данные разных спутников и каналов измерений. Разные наборы усваиваются с разными значениями радиусов локализации и инфляций (мультипликативной и аддитивной).

В **разделе 3.4** приводится описание проблем, связанных с ошибкой вертикальной привязки наблюдений AMV. Составляющая ошибки, вносимая при определении высоты наблюдения AMV, является самой существенной частью общей ошибки, которая свойственна наблюдению. Предложен способ преодоления возникающих трудностей – переопределение высоты наблюдения AMV на основе поиска максимально близкого ветра в поле первого приближения [Yang et. al., 2012] к наблюдаемому ветру. Процедура переопределения высоты наблюдений AMV позволила уменьшить ошибки модельных прогнозов с заблаговременностью от 1 до 5 суток. На рисунке 2 приводится сравнение осреднённых за январь 2015 года среднеквадратических ошибок прогностических переменных по внетропической части Северного полушария (20° – 90° с.ш.) и Южного полушария (20° – 90° ю.ш.). Сравнимые выборки содержат по 62 элемента. Как было указано выше, для этих экспериментов применялась модель ПЛАВ в версии с постоянным горизонтальным разрешением по пространству 0,9°× 0,72° и 28 вертикальными сигма-уровнями. Верифицировались прогнозы, стартовавшие в срок 00 ВСВ. Перед стартом основных прогнозов усвоение «разгонялось» в течение одного месяца для того, чтобы инициализированный с помощью применения аддитивного шума ансамбль первых приближений смог прийти в нормальный режим функционирования. Усваивались данные наблюдений со спутника Meteosat-7 в инфракрасном диапазоне. Приводятся средние за месяц значения и доверительные интервалы с уровнем доверия 0,95.

В разделе 3.5 описываются проблемы, связанные с наличием автокорреляций в ошибках наблюдений AMV. Из-за этого нарушается диагональность матрицы ковариаций ошибок наблюдений, что негативно сказывается на результатах работы системы усвоения. Для решения этих проблем в работе применяется учёт корреляции ошибок наблюдений, благодаря которому удаётся уменьшить ошибку получаемых результатов и учесть мелкомасштабные эффекты в полученных полях метеорологических параметров.

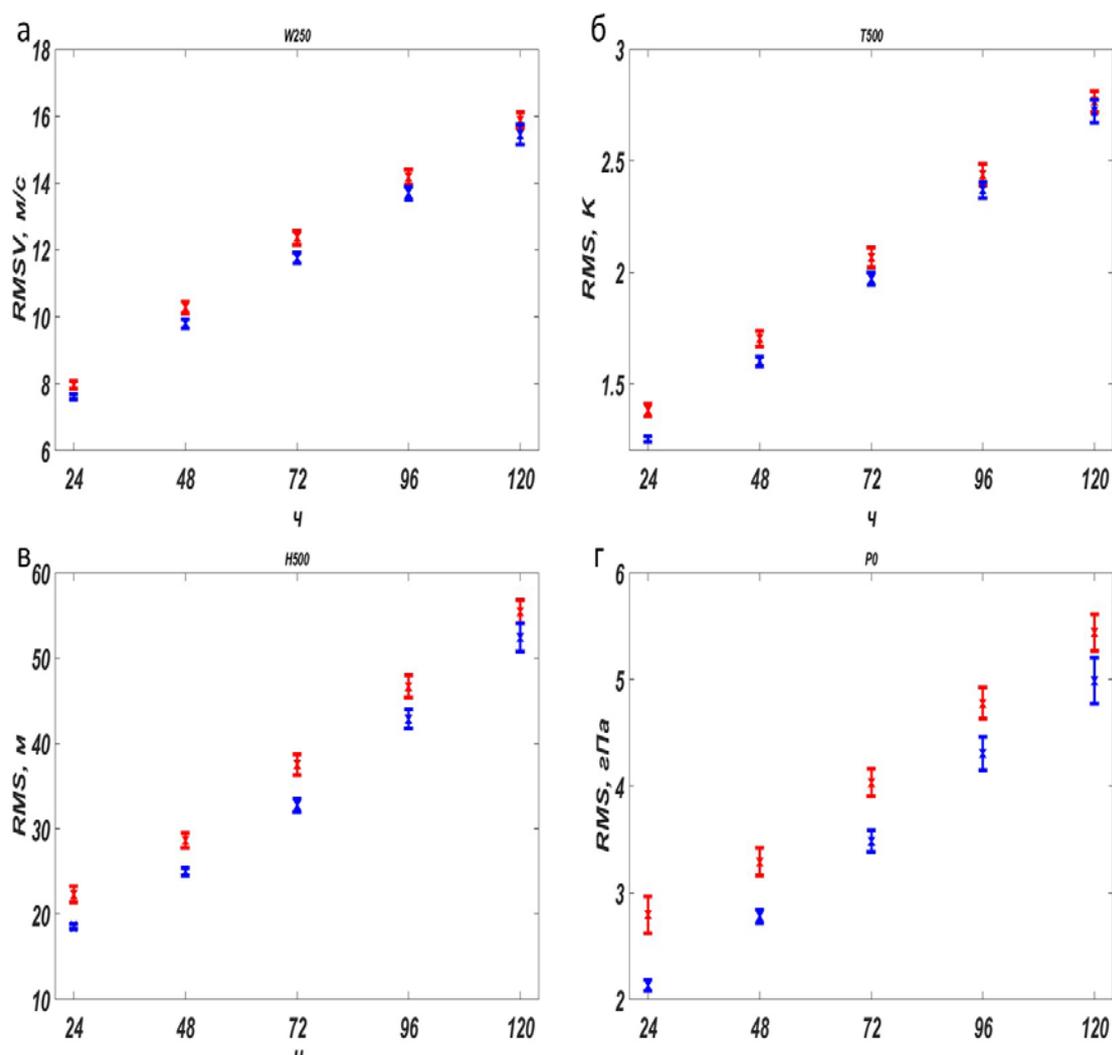


Рис. 2 – Среднеквадратическая ошибка полей прогнозов, осреднённая по внетропической части Северного полушария, и её доверительный интервал как функция заблаговременности прогноза. Красный цвет – прогнозы, рассчитанные при использовании анализов, включающих в себя усвоение AMV без переопределения высоты; синий цвет – прогнозы, стартовавшие с анализов, при получении которых высота AMV переопределялась. Верификация по полям оперативного анализа Гидрометцентра России. Прогностические поля: а) вектор скорости ветра на поверхности 250 гПа; б) температура на поверхности 500 гПа; в) геопотенциал 500 гПа; г) давление на уровне моря.

Результаты применения всех улучшений при усвоении данных AMV приводятся в разделе 3.6. На рисунке 3 показаны результаты сравнения осреднённых за май 2023 года среднеквадратических ошибок (столбцы) и их доверительные интервалы («свечи» на концах столбцов). Доверительные интервалы посчитаны с применением t-критерия Стьюдента с

уровнем доверия 95 %. Длина анализируемых выборок – 60. Зелёным цветом обведены столбцы, где изменения значимы в сторону уменьшения ошибки, красным – в сторону увеличения. Значимость различия оценивалась с помощью сравнения ежедневной разности оценок. Максимальный эффект от применения данных AMV наблюдается во внетропической части южного полушария (значимые уменьшения ошибки составили от 12 до 54 %).

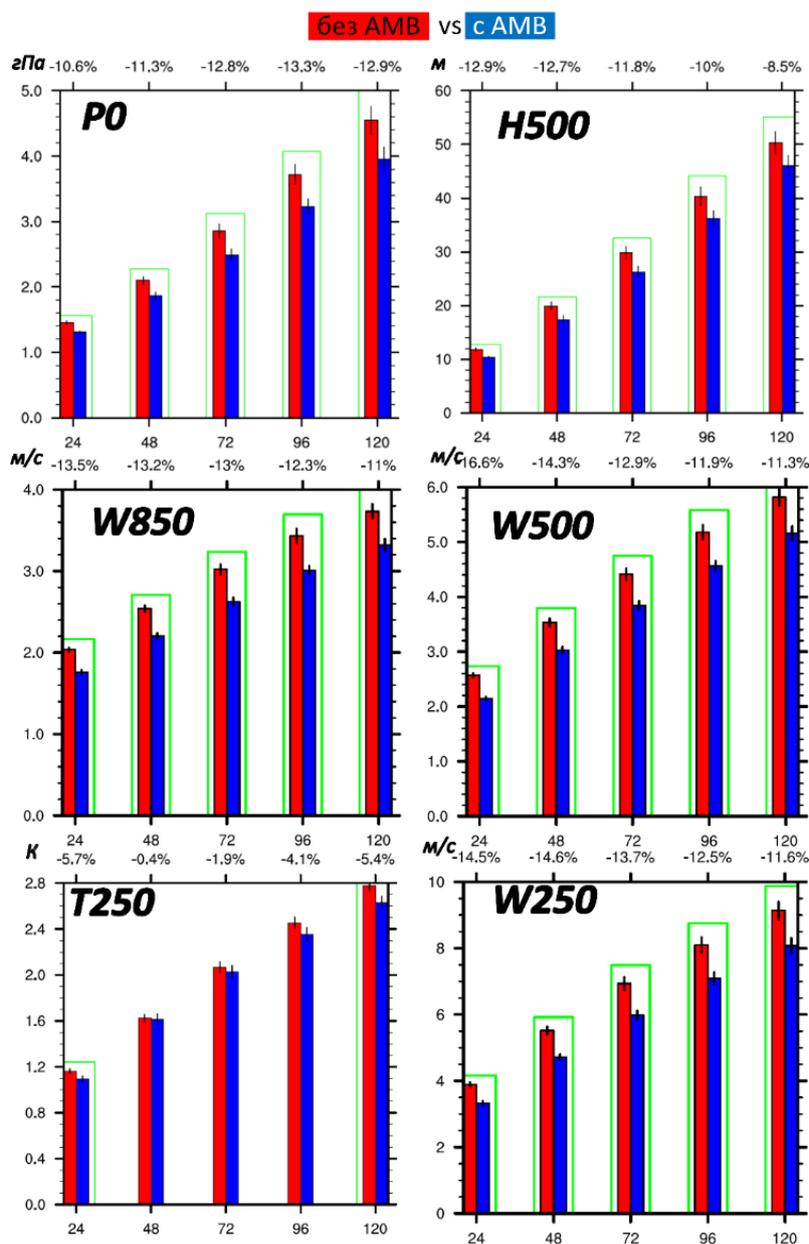


Рис. 3 – Среднеквадратические ошибки прогнозов без усвоения AMV (красные столбцы) и при усвоении AMV (синие столбцы) в зависимости от заблаговременности прогноза во внетропической части Северного полушария. Май 2023 года. Подписи на рисунке: P0 – давление на уровне моря; H500 – геопотенциал 500 гПа; T250 – температура на поверхности 500 гПа; W250, W500 и W850 – модуль скорости ветра на поверхностях 250 гПа, 500 гПа и 850 гПа соответственно

В главе 4 описываются процедура и результаты оперативных испытаний разработанной при участии автора технологии глобального ансамблевого среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ.

В разделе 4.1 приводится описание технологии, на которой основана система глобального ансамблевого среднесрочного прогноза. Большая часть спутниковых наблюдений (кроме данных AMV и ASCAT), несущих значительный объем информации о состоянии атмосферы, в настоящее время никак не учитываются в описанной выше ансамблевой системе усвоения. Это приводит к повышенной погрешности анализов (особенно в Южном полушарии, где число усваиваемых наблюдений невелико). Поэтому полученный в ходе усвоения ансамбль подвергается процедуре т. наз. «центрирования», которая применяется для повышения точности ансамблевого прогноза и состоит в использовании дополнительной информации – оперативных анализов Гидрометцентра России.

Суть центрирования состоит в следующем. Пусть $x_1^a, \dots, x_{N_f}^a$ – ансамбль анализов, сгенерированный ансамблевой системой усвоения на основе LETKF, $\bar{x}^a = \frac{\sum_i^{N_f} x_i^a}{N_f}$ – средний по ансамблю анализ. Пусть x^{op} – оперативный анализ Гидрометцентра. Тогда элементы центрированного ансамбля x^{ac}_i можно получить следующим образом:

$$x^{ac}_i = x_i^a + (x^{op} - \bar{x}^a).$$

Таким образом, среднеквадратичная ошибка ансамблевого прогноза наряду с точностью численной модели определяется оперативным анализом Гидрометцентра России, а разбросы ансамблей – системой усвоения LETKF.

Данные наблюдений AMV оказывают существенное положительное влияние на точность среднего по ансамблю прогноза. Так, были проведены эксперименты, в ходе которых ансамблевые прогнозы стартовали с начальных данных, подготовленных с использованием спутниковой информации о ветре AMV и без нее. На рисунке 4 представлено изменение показателей непрерывных ранговых вероятностных оценок (анг. continuous ranked probability score, CRPS), которые широко используются в качестве одного из критериев успешности ансамблевых прогнозов. Оценивались результаты за май 2023 года (выборки состоят из 31 элементов каждая). Синим цветом показано уменьшение показателя CRPS и его относительная величина (в процентах) этого улучшения. Красный цвет означает увеличение ошибки. Во внетропической части Южного полушария уменьшение показателя CRPS носят наиболее заметный характер. Наибольший положительный отклик на включение спутниковых данных ветра AMV можно отметить для полей геопотенциала 500 гПа и 850 гПа (порядка 60%) в первые сутки прогноза. Во внетропической части Северного полушария и в тропиках заметен слабый отклик на включение спутниковых данных ветра AMV.

Результаты оперативных испытаний описанной технологии приведены в разделе 4.2. В настоящее время эта технология применяется для расчёта оперативного ансамблевого среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России. Для примера на рисунке 5 приводится сравнение площадей под кривой ROC (ROCA) для аномалий различных прогностических полей, верифицируемых в оперативных испытаниях систем ансамблевого прогноза (САП).

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы:

1. Создана (совместно с соавторами) первая в России ансамблевая система усвоения данных наблюдений, работающая в оперативном режиме. Создана и применена методика настройки ансамблевой системы усвоения.

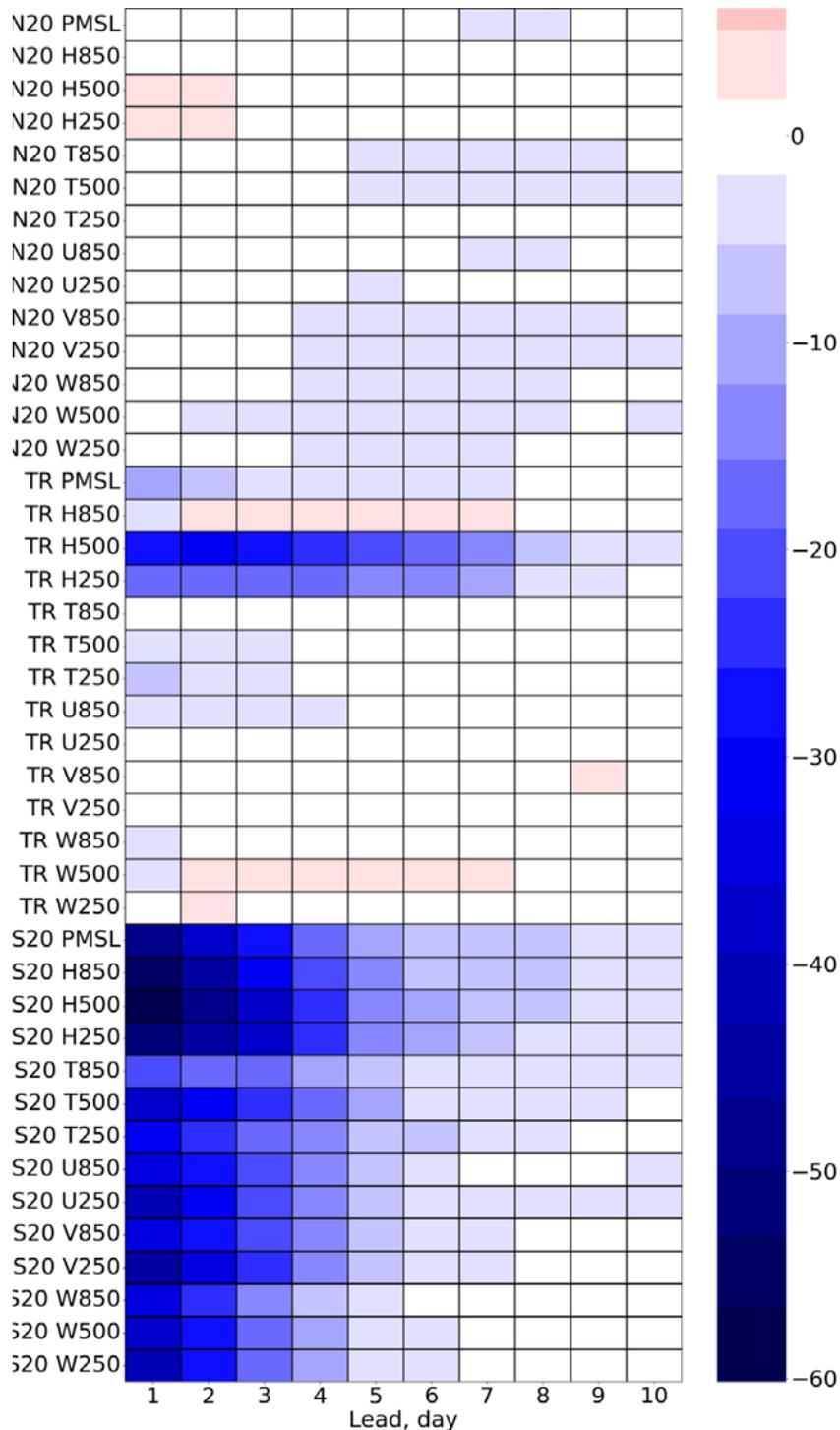


Рис. 4 – Изменение показателей CRPS для ансамблевых прогнозов с усвоением спутниковых данных AMV и без их усвоения за май 2023 года. Подписи на рисунке: N20 – внетропическая часть Северного полушария; Tr – тропики; S20 – внетропическая часть Южного полушария; PMSL – давление на уровне моря; H250, H500 и H850 – геопотенциал 250 гПа, 500 гПа и 850 гПа соответственно; T250, T500 и T850 – температура на поверхностях 250 гПа, 500 гПа и 850 гПа соответственно; W250, W500 и W850 – модуль скорости ветра на поверхностях 250

гПа, 500 гПа и 850 гПа соответственно; U250, U500 и U850 – зональная компонента скорости ветра на поверхностях 250 гПа, 500 гПа и 850 гПа соответственно; V250, V500 и V850 – меридиональная компонента скорости ветра на поверхностях 250 гПа, 500 гПа и 850 гПа соответственно

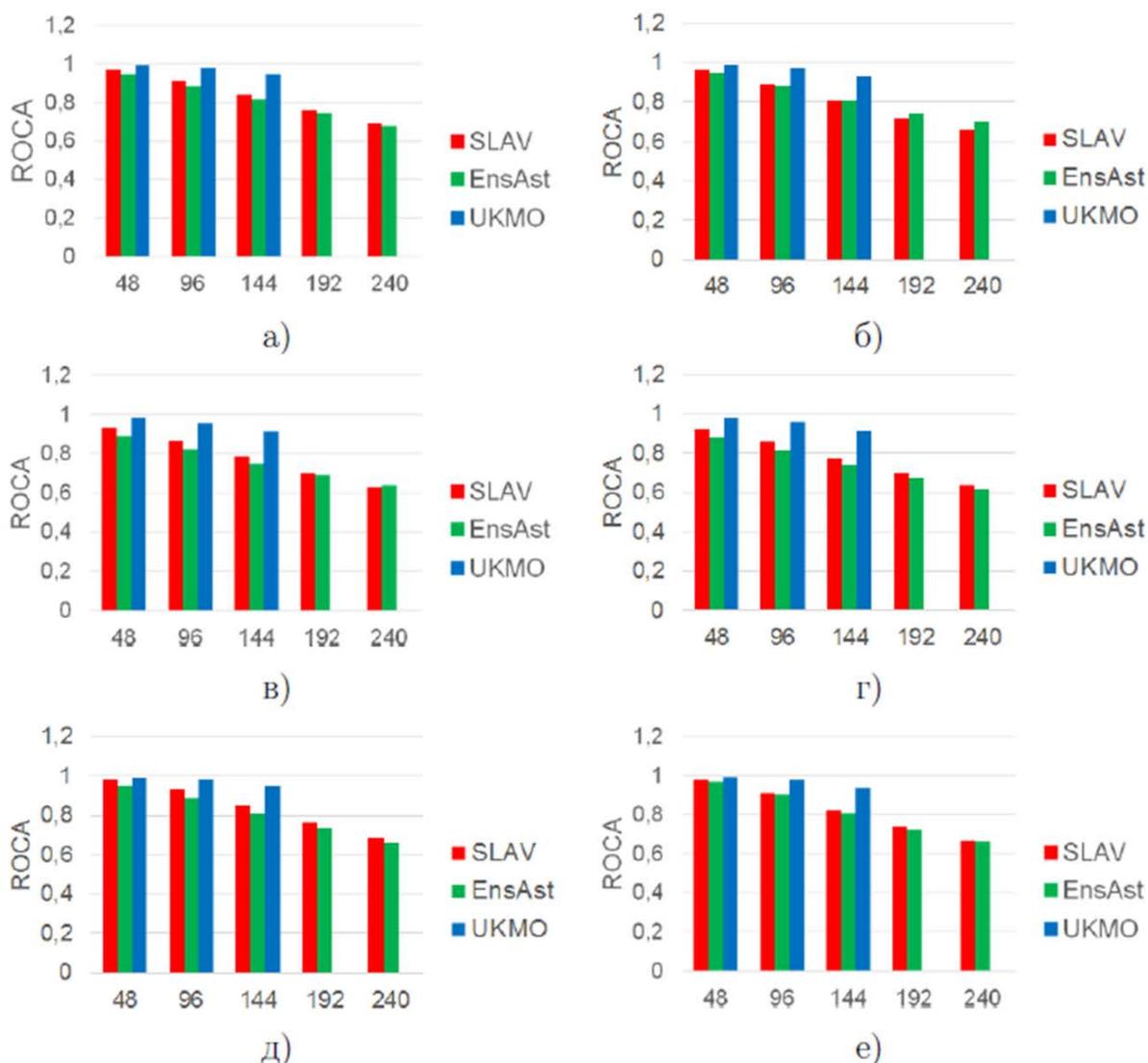


Рис. 5 – Площади под ROC кривыми, рассчитанные в период испытаний для положительных аномалий более 1 стандартного отклонения (а, в, д) и отрицательных аномалий менее 1 стандартного отклонения (б, г, е) полей приземного давления (а, б), температуры на поверхности 850гПа (в, г) и геопотенциала 500 гПа (д, е) в Южном полушарии по результатам ансамблевых прогнозов САП ПЛАВ (красные столбцы), САП на основе спектральной модели T169L31 (зеленые столбцы) и САП UKMO (синие столбцы).

Горизонтальная шкала – заблаговременность прогноза в часах

2. Учет свойств данных спутниковых наблюдений ветра AMV повысил точность полей ансамбля начальных данных и среднесрочных прогнозов на их основе. Этот результат достигнут за счёт переопределения высоты наблюдения AMV и моделирования недиагональной матрицы ковариации ошибок наблюдений AMV. Переопределение высоты

выполняется с помощью вычисления коэффициента согласованности ветра. Моделирование матрицы ковариации ошибок наблюдений AMV позволяет более точно учитывать связи ошибок наблюдений для учёта корреляции в ошибках наблюдений AMV. Значимые уменьшения ошибки составили от 12 до 54 % во внетропической части Северного полушария.

3. На основе представленной ансамблевой системы усвоения разработана, испытана и внедрена (с соавторами) система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды. Для получения этого результата описанная система усвоения была адаптирована к применению в рамках системы ансамблевого прогноза, которая прошла оперативные испытания и по их результатам была принята в качестве оперативной в Гидрометцентре России, показав лучшие результаты в сравнении с предыдущей системой и сравнимые с зарубежными аналогами.

В результате была решена важная научная задача, имеющая существенное значение для развития численного прогноза погоды в России – повышение качества среднесрочного ансамблевого прогноза. Представленная система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды внедрена в оперативную практику Гидрометцентра России в 2022 году.

Статьи по теме диссертации в научных журналах из перечня ВАК

1. Shlyayeva A. V., Tolstykh M. A., **Mizyak V. G.**, Rogutov V. S. Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model //Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2013. – V. 28. – №. 4. – P. 419-442.

2. **Мизяк В. Г.**, Шляева А. В., Толстых М. А. Использование данных спутниковых наблюдений ветра AMV в системе ансамблевого усвоения данных // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 6. – С. 87–99.

3. **Мизяк В. Г.**, Шляева А. В., Толстых М. А. Учет скоррелированности ошибок спутниковых данных наблюдений AMV в ансамблевой системе усвоения данных // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 3. – С. 20–31.

4. Alipova K. A., Goyman G. S., Tolstykh M. A., **Mizyak V. G.**, Rogutov V. S. Stochastic perturbation of tendencies and parameters of parameterizations in the global ensemble prediction system based on the SL-AV model //Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2022. – V. 37. – №. 6. – P. 331-347.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. **Мизяк В. Г.** Программа для переопределения высоты спутниковых наблюдений ветра AMV, используемых в системе усвоения на основе LETKF // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015619120. Дата государственной регистрации 25 августа 2015 г.

2. **Мизяк В. Г.** Программа верификации ансамблевых прогнозов модели ПЛАВ // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016662860. Дата государственной регистрации 18 января 2017 г.

3. **Мизяк В. Г.**, Рогутов В.С. Программа для подготовки итогового ансамбля начальных данных для ансамблевой системы прогноза погоды с учетом данных оперативного

объективного анализа атмосферы // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019662263. Дата государственной регистрации 19 сентября 2019 г.

Прочие публикации автора по теме диссертации

1. Толстых М. А., Богословский Н. Н., Шляева А. В., Мизяк В. Г. Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2011. – № 346. – С. 145-154.

2. Толстых М. А., Мизяк В. Г. Параллельная версия полулагранжевой модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением порядка 20 км // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2011. – № 346. – С. 155-161.

3. Шляева А. В., Мизяк В. Г., Толстых М. А. Экспериментальная система усвоения данных на основе локального ансамблевого фильтра Калмана для глобальной модели атмосферы // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – № 348. – С. 30–42.

4. Мизяк В. Г., Шляева А. В., Толстых М. А. Параллельная реализация локального ансамблевого фильтра Калмана для усвоения атмосферных данных // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 6(18). – С. 30.

5. Мизяк В. Г., Шляева А. В., Толстых М. А. Использование данных спутниковых наблюдений AMV в системе усвоения на основе LETKF // CITES-2015, Томск, 26–30 июня 2015 года. – Томск: Томский центр научно-технической информации. – 2015. – С. 137-141.

6. Толстых М. А., Желен Ж.-Ф., Володин Е. М., Богословский Н. Н., Вильфанд Р. М., Киктев Д. Б., Красюк Т. В., Кострыкин С. В., Мизяк В. Г., Фадеев Р. Ю., Шашкин В. В., Шляева А. В., Эзау И. Н., Юрова А. Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 6. – С. 25–35.

7. Мизяк В. Г., Шляева А. В., Толстых М. А. Использование коррелированных ошибок спутниковых данных наблюдений AMV в ансамблевой системе усвоения данных на основе LETKF // CITES 2017: Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде, Таруса – Звенигород, 28 августа – 07 сентября 2017 года. – Таруса - Звенигород: Томский центр научно-технической информации. – 2017. – С. 156-160.

8. Рогутов В. С., Толстых М. А., Мизяк В. Г. Система ансамблевого прогноза на основе локального ансамблевого фильтра Калмана // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2017. – № 364. – С. 5–19.

9. Толстых М. А., Фадеев Р. Ю., Шляева А. В., Мизяк В. Г., Рогутов В. С., Богословский Н. Н., Гойман Г. С., Махнорылова С. В., Юрова А. Ю., Шашкин В. В. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. – М.: Триада лтд, 2017. – 166 с.

10. Толстых М. А., Фадеев Р. Ю., Шашкин В. В., Гойман Г. С., Зарипов Р. Б., Киктев Д. Б., Махнорылова С. В., Мизяк В. Г., Рогутов В. С. Многомасштабная глобальная модель

атмосферы ПЛАВ: результаты среднесрочных прогнозов погоды //Метеорология и гидрология. – 2018. – №. 11. – С. 90-99.

11. Мизяк В. Г., Рогутов В. С., Толстых М. А. Развитие ансамблевой системы среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России. Используемые наблюдения и особенности их усвоения // СITES'2019: Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде, Москва, 27 мая – 06 июня 2019 года: Томский центр научно-технической информации – 2019. – С. 324–327.

12. Толстых М. А., Фадеев Р. Ю., Шашкин В. В., Травова С. В., Гойман Г. С., Мизяк В. Г., Рогутов В. С., Шляева А. В., Юрова А. Ю. Развитие глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ в 2009-2019 гг // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 4. – С. 77–91.

13. Mizyak V., Rogutov V., Alipova K. Development of the new ensemble weather prediction system at the Hydrometcentre of Russia //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1740. – №. 1. – С. 012072.

14. Мизяк В. Г., Толстых М. А., Рогутов В. С., Алипова К. А., Гойман Г. С. Система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России на основе модели ПЛАВ: Первые результаты // ENVIROMIS 2022. – 2022. – С. 98–101.

15. Мизяк В. Г., Толстых М. А., Алипова К. А., Рогутов В. С., Гойман Г. С. Система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ // ENVIROMIS 2022 : Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, Томск, 12–17 сентября 2022 года. – Томск: Томский центр научно-технической информации. – 2022. – С. 98–101.

16. Мизяк В. Г., Алипова К. А., Толстых М. А., Рогутов В. С. Результаты оперативных испытаний глобальной системы ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – № 50. – С. 44–65.