УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной и инновационной деятельности Национального исследовательского Томского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор

_____ Ворожцов Александр Борисович

« 04 » сентября 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Алиповой Ксении Александровны «Система ансамблевого прогноза погоды с учетом неопределенностей модели», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа К.А. Алиповой посвящена разработке и практической реализации алгоритмов учета неопределенностей математических моделей и численных методов, используемых в новейших системах ансамблевого среднесрочного и долгосрочного прогноза погоды.

Тема исследования является одним из актуальных современных направлений применения методов математического моделирования и эффективных вычислительных технологий в повышении качества среднесрочного или долгосрочного численного прогноза погоды.

Актуальность. Проблема получения качественного численного прогноза погоды является актуальной на протяжении многих десятилетий и, по-прежнему, остается центральной для основных государственных метеорологических служб и офисов по всему миру. При использовании детерминистических моделей численного прогноза погоды, опирающихся на нестационарные гидротермодинамические дифференциальные уравнения, для получения надежного прогноза погоды по всему Земному шару необходимо иметь достаточно точное и подробное начальное распределение метеорологических параметров по всей области исследования, качественные параметризации явно не разрешаемых на используемой вычислительной сетке важных для моделирования погоды физических процессов и устойчивых численных методов высокого порядка

аппроксимации. Однако при современном развитии вычислительной техники и системы погодных наблюдений выполнение перечисленных условий успешного детерминистического среднесрочного или долгосрочного прогноза погоды почти невозможно. Начальные поля метеовеличин формируются с некоторой погрешностью из дискретных с разной пространственной плотностью значений измерений. Горизонтальный шаг вычислительной сетки при моделировании погоды по всему Земному шару составляет несколько десятков километров, что заставляет для процессов меньших масштабов привлекать упрощенные физико-математические параметризации. Все это увеличивает неопределенности (неустранимые погрешности) применяемых моделей численного прогноза погоды. Одним из путей учета (снижения влияния на конечный результат) такого рода неопределенностей является привлечение системы ансамблевого прогноза погоды, которые хотя и очень требовательны к производительности используемых вычислительных ресурсов, тем не менее позволяют оценить вероятность возникновения/исчезновения тех или иных существенных погодных явлений на основе нескольких десятков запусков детерминистических моделей атмосферы с внесенной погрешностью/возмущениями начальных условий, параметров математической модели или используемой в расчетах вычислительной методики. Развитие такого подхода в среднесрочном или долгосрочном прогнозе погоды к настоящему времени заметно повысило оправдываемость прогнозов погоды. Поэтому исследования, обеспечивающие успешность численных прогнозов погоды, являются актуальными и практически востребованными.

Цель и задачи диссертационной работы. К ним можно отнести разработку и внедрение в развиваемую в Гидрометцентре России глобальную модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ систему учета неопределенностей (неустранимых и численных погрешностей) физико-математических параметризаций и вычислительных технологий при среднесрочном и долгосрочном прогнозе погоды. Для достижения этой цели были решены следующие задачи: проведено сравнение существующих подходов к оценке влияния неопределенностей современных моделей численного прогноза погоды, выбор наиболее перспективных и разработка новых способов их учета, апробация разработанных новых подходов и их соответствующая настройка при ансамблевых прогнозах погоды с помощью модели ПЛАВ.

Структура и основное содержание диссертационной работы. Диссертация изложена на 131 странице машинописного текста, содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы из 166 наименований и 4 приложения (список стохастически возмущаемых параметров в модели ПЛАВ; некоторые оценки качества ансамблевых прогнозов; акт внедрения технологии ансамблевых прогнозов; 2 свидетельства о госрегистрации программ для ЭВМ).

Первая глава – обзорная, в ней дан аналитический обзор алгоритмов, применяемых для учета неопределенностей/погрешностей, возникающих при моделировании не разрешаемых явно физических процессов, при численном решении гидродинамических уравнений, а также при задании начальных условий для прогностических моделей. Во второй главе дается описание используемой для достижения цели диссертационного исследования системы ансамблевого среднесрочного прогноза погоды: системы усвоения данных, опирающейся на локальный ансамблевый фильтр Калмана, глобальную модель общей циркуляции ПЛАВ. В третьей главе представлены реализация, численные эксперименты и результаты применения стохастических возмущений параметров модели ПЛАВ для ансамблевых прогнозов. Стохастические возмущения параметров и тенденций в параметризациях ПЛАВ позволило повысить качество среднесрочных численных прогнозов. В четвертой главе рассматриваются способы возмущений полулагранжевых траекторий в модели ПЛАВ, результаты численных экспериментов испытания системы среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ20. Разработанный автором новый вариант позволил повысить качество ансамблевого среднесрочного прогноза погоды.

Научная новизна работы в основном заключается в следующем:

1. Разработан и апробирован новый вариант стохастического возмущения полулагранжевых траекторий в гидродинамическом блоке глобальной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ.

2. На примере модели ПЛАВ реализованы новые варианты стохастических алгоритмов совместного учета неопределенностей/погрешностей в параметризациях подсеточных процессов и в вычислительных полулагранжевых схемах гидродинамического блока глобальной модели общей циркуляции, используемых в ансамблевых среднесрочном и долгосрочном прогнозе погоды.

3. Получены новые результаты по оценке влияния возмущения различных наборов параметров на качество предсказуемости модели ПЛАВ при долгосрочном прогнозе погоды.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается результатами сравнения численных прогнозов с реанализом и спутниковыми измерениями, а также данными оперативного анализа Гидрометцентра России. Основные результаты работы согласуются с результатами других авторов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Исследование вносит заметный вклад в развитие теории и вычислительных технологий учета неопределенностей (неустранимых и вычислительных погрешностей) прогностических моделей атмосферы за счет стохастических возмущений параметров численной модели атмосферной циркуляции при ансамблевом среднесрочном и долгосрочном прогнозе погоды. Отдельно следует отметить

разработку новых вариантов алгоритма стохастических возмущений полулагранжевых траекторий в гидродинамическом блоке модели ПЛАВ.

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы специалистами академических и прикладных институтов (ИВМ РАН, ИО РАН, ИВМиМГ СО РАН, ФИЦ ИВТ СО РАН, ИВМ СО РАН, ИМКЭС СО РАН, ВНИИГМИ-МЦД, СибНИГМИ) при разработке ансамблевых систем среднесрочного и долгосрочного прогнозирования состояния атмосферы и океана в условиях неопределенностей параметров моделей и численных методов их реализации.

Результаты исследования внедрены и используются в новой системе ансамблевого среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 конференциях российского и международного уровня, начиная с 2020 г.

Основные результаты диссертации являются новыми, научно обоснованными и отражены в 7 работах, в том числе в 3 статьях в научных журналах, которые включены в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций. Получены 2 свидетельства государственной регистрации программы для ЭВМ.

Содержание автореферата соответствует основному содержанию диссертации, а основные результаты работы, полученные в диссертации, вполне соответствуют сформулированной автором цели и поставленным задачам.

По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Вызывает сомнение формулировка второго пункта научной новизны диссертации «Впервые в гидродинамической модели атмосферы ПЛАВ реализованы стохастические алгоритмы учета неопределенностей». В чем здесь новизна для науки в целом?

2. Для успешной реализации разработанных в диссертации стохастических алгоритмов учета неопределенностей требуется их ручная настройка. К сожалению, в диссертации отсутствуют рекомендации выбора значений, используемых в настройках, которые, безусловно, повысили бы универсальность и полезность полученных результатов при ансамблевом численном прогнозировании погоды.

3. При реализации алгоритма возмущения значений параметров параметризаций в модели ПЛАВ из 26 параметров и 2 тенденций «было выделено 6 параметров и 2 тенденции» (стр. 50). К сожалению, не указан способ предварительной оценки их значимости.

Указанные недостатки не снижают достоинств работы, которая выполнена на высоком научном уровне и соответствует всем квалификационным требованиям и, в частности, п. 9, действующего «Положения о присуждении учёных степеней»,

предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата, доктора физико-математических наук.

На основании вышеизложенного можно сделать заключение, что диссертационная работа Алиповой Ксении Александровны «Система ансамблевого прогноза погоды с учетом неопределенностей модели» удовлетворяет всем необходимым требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно действующему «Положению о присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв подготовлен заведующим кафедрой вычислительной математики и компьютерного моделирования Томского государственного университета, доктором физико-математических наук, профессором Старченко Александром Васильевичем.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры вычислительной математики и компьютерного моделирования Томского государственного университета (протокол № 1 от 01.09.2025).

Заведующий кафедрой вычислительной математики и компьютерного моделирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», доктор физико-математических наук, профессор

Старченко Александр Васильевич

«01» сентября 2025 г.

Сведения о ведущей организации:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; (3822) 52-98-52; rector@tsu.ru; http://www.tsu.ru

Подпись удостоверяю
Ведущий документовед
Андриенко И.В.