

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук
Пененко Алексея Владимировича на диссертационную работу

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.

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа К.А. Алиповой представляет собой исследование в области совершенствования методов ансамблевого прогноза погоды. Тема этого исследования, безусловно, является актуальной, поскольку ансамблевый метод широко применяется в средне- и долгосрочном прогнозе погоды, а также позволяет получать вероятностные прогнозы. Одним из способов повышения качества ансамблевых прогнозов погоды может служить разработка алгоритмов учета неопределенностей в начальных данных и в модели атмосферы. Осложняющими факторами при разработке алгоритмов учета указанных типов неопределенностей выступают нелинейная неустойчивость, присущая атмосфере, а также отсутствие точной информации об источниках неопределенности в гидродинамической модели атмосферы и начальных данных. Одной из характеристик ансамбля является разброс прогностического ансамбля. В идеальном случае разброс ансамбля прогнозов должен быть близок к среднеквадратической ошибке среднего по ансамблю прогноза, и в большинстве случаев добиться такого результата невозможно без применения методов учета неопределенностей в модели атмосферы.

Автор диссертации успешно разработала и реализовала алгоритмы учета неопределенностей в глобальной модели общей циркуляции атмосферы и применила их в ансамблевом среднесрочном и долгосрочном прогнозе погоды. Для этого автором диссертации было решено несколько сложных задач: выполнено сравнение существующих подходов к описанию неопределенностей в моделях численного прогноза погоды и выбраны алгоритмы для реализации в модели ПЛАВ; реализованы выбранные и разработаны новые алгоритмы учета неопределенностей в модели ПЛАВ, произведена соответствующая настройка; исследовано качество получаемых ансамблевых прогнозов моделью ПЛАВ с применением реализованных алгоритмов.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 4 приложений.

Во введении отмечается актуальность, формулируются цели и задачи диссертационной работы, излагаются основные положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, научная новизна полученных результатов и личный вклад соискателя.

Первая глава содержит обзор литературы, посвященной методам учета неопределенностей в начальных данных и в моделях атмосферы. Основной акцент сделан на неопределенностях, возникающих в параметризациях процессов подсеточного масштаба и блоке решения уравнений динамики атмосферы. Описаны существующие детерминистские и стохастические подходы, применяемые для учета таких неопределенностей. В выводах первой главы отмечены выбранные для реализации алгоритмы стохастического возмущения тенденций и параметров параметризаций и полулагранжевых траекторий.

Во второй главе описывается система ансамблевого прогноза погоды, включающая в себя систему ансамблевого усвоения данных, развиваемую в

Гидрометцентре России, и глобальную полулагранжеву гидродинамическую модель атмосферы ПЛАВ, развиваемую в ИВМ РАН и Гидрометцентре России. Один из разделов главы посвящен применяемой в работе ансамблевой системе верификации прогнозов. В этой главе основное внимание уделяется описанию модели атмосферы ПЛАВ, поскольку разработка и реализация стохастических алгоритмов учета неопределенностей производилась именно в данной модели атмосферы, не затрагивая систему подготовки начальных данных. Приводятся характеристики двух разных версий модели ПЛАВ, которые отличаются пространственным разрешением – версия модели с более грубым разрешением порядка 80 км будет применяться в главе 3, а версия с более высоким разрешением порядка 20 км – в главе 4. Результатом второй главы, полученным при участии автора, является реализация в модели ПЛАВ генератора стохастических возмущений. Получаемые возмущения скоррелированы по времени и по пространству. Данный генератор будет в дальнейшем применяться во всех реализованных стохастических алгоритмах.

Третья глава посвящена реализации в модели ПЛАВ известных алгоритмов стохастического возмущения параметров и тенденций, рассчитываемых в блоке параметризаций. Основная сложность, возникающая при реализации этих алгоритмов, заключается в их «модельной зависимости», что не позволяет использовать готовые решения, применяемые в зарубежных моделях атмосферы. Кроме того, каждая модель атмосферы имеет свой оригинальный набор переменных, количество которых измеряется в десятках, что делает выбор возмущаемых параметров нетривиальной задачей. Автор диссертации с этой задачей успешно справилась, адаптировав зарубежные алгоритмы для кода модели ПЛАВ и обосновав выбор 27 параметров и 2 тенденций параметризаций для возмущения. Стоит отметить большой объем численных экспериментов, проведенный автором для калибровки амплитуды возмущений, которую можно сделать только эмпирически. Результаты авторских численных экспериментов показали существенное увеличение

разброса прогностического ансамбля, которое приблизило его к среднеквадратической ошибке среднего по ансамблю прогноза. При этом сама ошибка почти не изменилась. Наиболее важным результатом данной главы является улучшение вероятностных оценок ансамблевых среднесрочных прогнозов погоды. Помимо авторских численных экспериментов в третьей главе приводятся результаты оперативных испытаний, проведенных в Гидрометцентре России, где результаты модели ПЛАВ сравнивались с другими моделями. Новая версия системы ансамблевого среднесрочного прогноза, куда вошли реализованные диссертантом стохастические алгоритмы, показала лучшие результаты по сравнению с предыдущей оперативной системой ансамблевого прогноза Гидрометцентра России и была внедрена в оперативном режиме. Стоит также отметить проведенное автором диссертации оригинальное исследование влияния выбора набора возмущаемых параметров и амплитуды их возмущений на оценки долгосрочных ансамблевых прогнозов. Автор делает вывод о возможности возмущения всего лишь трёх параметров для получения достаточного разброса ансамбля и повышения качества ансамблевых долгосрочных прогнозов модели ПЛАВ.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке и реализации новых вариантов алгоритма стохастического возмущения полулагранжевых траекторий в блоке решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ. Автор последовательно излагает суть разработанных и реализованных новых версий алгоритма возмущения полулагранжевых траекторий, отмечает их отличия. Применение выбранного варианта алгоритма в модели ПЛАВ наряду с применением алгоритмов, реализованных в третьей главе, показало дополнительное повышение качества вероятностных ансамблевых прогнозов модели ПЛАВ в версии с более высоким горизонтальным разрешением. Еще одним важным результатом главы 4 является внедрение разработанной и реализованной версии алгоритма стохастического возмущения

полулагранжевых траекторий в оперативную версию системы ансамблевого прогноза.

В заключении приводятся основные результаты диссертации.

В приложении А приводится список стохастически возмущаемых параметров в модели ПЛАВ. В приложении Б перечислены некоторые детерминистские и вероятностные оценки качества прогнозов, применяемые в работе. Приложения В и Г содержат соответственно акт внедрения технологии ансамблевого прогноза погоды и полученные свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Научная новизна. Все результаты диссертации, вынесенные на защиту, являются новыми. Автором предложен новый вариант алгоритма стохастического возмущения полулагранжевых траекторий в блоке решения уравнений динамики атмосферы. Впервые в гидродинамической модели атмосферы ПЛАВ реализованы стохастические алгоритмы учета неопределенностей. Впервые выполнено исследование влияния возмущения различных наборов параметров на оценки модели ПЛАВ для долгосрочных прогнозов.

Теоретическая и практическая ценность диссертационной работы. Теоретическая ценность работы состоит в разработке новых вариантов алгоритма стохастического возмущения полулагранжевых траекторий. Практическая ценность диссертации заключается во внедрении всех полученных алгоритмов в новую систему ансамблевого среднесрочного прогноза погоды для оперативного применения в Гидрометцентре России (система совместно с соавторами реализована, испытана и внедрена); а также в повышении качества ансамблевых среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды в Гидрометцентре России.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Обоснованность и достоверность результатов третьей и четвертой главы

подтверждается обширными численными экспериментами и верификацией их результатов относительно оперативных анализов Гидрометцентра России. Обоснованность и достоверность численных экспериментов в разделе 3.5 подтверждается сравнением их результатов с данными реанализа и с прямыми спутниковых наблюдений. Обоснованность и достоверность результатов оперативных испытаний в разделах 3.3.2 и 4.3.3 подтверждается сравнением оценок полученных прогнозов с аналогичными оценками, полученными для зарубежных систем ансамблевого прогноза.

Замечания по работе:

1. В Главах 1 и 2 желательно было бы добавить формализаций (например, на языке динамических систем) понятий прогноза, ансамблевого прогноза, его качества и надежности, заблаговременности и др.
2. В п.3.5 указано, что результаты получены для версии модели с низким пространственным разрешением. Как изменятся (сохранятся ли) результаты при увеличении разрешения?
3. Желательно пояснить, почему в алгоритме стохастического возмущения компонент скорости ветра (п 4.2.2) возмущаются только компоненты, которые используются в уравнении траекторий? Имеется ли связь между возмущением тенденций и возмущением компонент скорости ветра?

Общая оценка работы. Вышеуказанные замечания не снижают общей положительной оценки работы, которую можно охарактеризовать как законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Результаты работы являются новыми и имеют научную и практическую ценность.

Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах и многих международных и всероссийских конференциях.

Основные результаты диссертации опубликованы в 3 работах в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы

основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Полученные в диссертации результаты были внедрены в систему ансамблевого прогноза для оперативного применения. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Считаю, что диссертация отвечает всем квалификационным требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленными «Положением о присуждении ученых степеней», а ее автор **Алипова Ксения Александровна** заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук,
заместитель директора по научной
работе и ведущий научный
сотрудник Института
Вычислительной Математики и
Математической Геофизики
СО РАН



Пененко Алексей
Владимирович

« 10 » сентября 2025 г.

Подпись заместителя директора по научной работе и ведущего научного сотрудника ИВМиМГ СО РАН, доктора физ.-мат. наук Пененко Алексея Владимировича заверяю

Заведующий отделом кадров
ИВМиМГ СО РАН



Трофимкина Е.Ю.

« 10 » сентября 2025 г.