

На правах рукописи

Алипова Ксения Александровна

**СИСТЕМА АНСАМБЛЕВОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ С УЧЕТОМ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ МОДЕЛИ**

Специальность 1.2.2 —
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук и Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Толстых Михаил Андреевич

Официальные оппоненты: **Пененко Алексей Владимирович**,
доктор физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт вычислительной математики и
математической геофизики Сибирского отделения
Российской академии наук, заместитель директора

Климова Екатерина Георгиевна,
доктор физико-математических наук, доцент
Федеральный исследовательский центр информационных и
вычислительных технологий, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится 2 октября 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.455.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8, ауд. 727.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИВМ РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8, ИВМ РАН, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.455.01.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета 24.1.455.01,
доктор физико-математических наук

Г.А. Бочаров

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Важность развития методов ансамблевого прогноза заключается, во-первых, в том, что только из ансамбля можно получить вероятностный прогноз наступления тех или иных (в том числе опасных) погодных явлений. Во-вторых, в том, что детерминистский прогноз ограничен пределом предсказуемости, который в разных случаях может составлять 5-7 суток.

Неопределенность прогноза вызвана как ошибками в начальных данных (ошибки измерений, репрезентативности), так и ошибками прогностической модели (ошибки аппроксимации, применяемые упрощенные описания физических процессов). При вычислении ансамблевых прогнозов берется ансамбль немного отличающихся начальных данных, и на основе их получается ансамбль прогнозов.

Разброс ансамбля должен быть близок к среднеквадратической ошибке среднего по ансамблю прогноза¹. Тогда, во-первых, не будет возникать переоценка или недооценка неопределенности, а во-вторых, по такому ансамблю можно производить априорную оценку ошибки прогноза.

Целью данной работы является разработка и реализация алгоритмов учета неопределенностей в глобальной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ (ПолуЛагранжева, на основе уравнения Абсолютной заВихренности) и их применение в ансамблевом среднесрочном и долгосрочном прогнозе погоды.

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

1. Выполнить сравнение существующих подходов к описанию неопределенностей в моделях численного прогноза погоды и выбрать алгоритмы для реализации в модели ПЛАВ.
2. Реализовать выбранные в п. 1. и разработать новые алгоритмы учета неопределенностей в модели ПЛАВ, выполнить необходимую настройку.
3. Исследовать качество получаемых ансамблевых прогнозов модели ПЛАВ с применением реализованных алгоритмов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Стохастические алгоритмы в параметризациях модели ПЛАВ увеличивают разброс прогностического ансамбля и повышают качество ансамблевых прогнозов погоды.
2. Для полулагранжевых моделей атмосферы стохастическое возмущение полулагранжевых траекторий, реализованное с применением разработанного нового варианта алгоритма, увеличивает разброс ансамбля и повышает качество ансамблевых прогнозов погоды.
3. Совместное применение стохастических алгоритмов в параметризациях (п. 1) и в динамике (п. 2) позволяет получить наилучшие для модели ПЛАВ вероятностные оценки ансамблевых среднесрочных прогнозов погоды.

Научная новизна:

1. Предложен новый вариант алгоритма стохастического возмущения полулагранжевых траекторий в блоке решения уравнений динамики атмосферы.
2. Впервые в гидродинамической модели атмосферы ПЛАВ реализованы стохастические алгоритмы учета неопределенностей.

¹ Whitaker et al. Mon. Wea. Rev. 1998

3. Выполнено оригинальное исследование влияния возмущения различных наборов параметров на оценки модели ПЛАВ для долгосрочных прогнозов.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке новых вариантов алгоритма стохастического возмущения полулагранжевых траекторий.

Практическая значимость диссертационной работы состоит во внедрении 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.

Достоверность полученных с помощью результатов обеспечивается верификацией численных прогнозов: вычисляются ошибки среднесрочных прогнозов относительно оперативных анализов Гидрометцентра России; долгосрочные прогнозы сравниваются с данными реанализа и спутниковыми измерениями (для некоторых переменных). Результаты согласуются с результатами, полученными другими авторами. Для всех результатов выполнена проверка статистической значимости критерием Стьюдента для парных выборок с уровнем значимости 95 %.

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

1. Международная конференция «International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond (CSP2020)», 12–16 октября 2020 г., Москва, Россия (устный онлайн доклад).

2. Международная конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES-2021», 22–27 ноября 2021 г., Москва, Россия (устный доклад).

3. 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 29 ноября – 3 декабря 2021 г., Москва–Долгопрудный–Жуковский (устный онлайн доклад).

4. Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная памяти академика А. М. Обухова, 22–24 ноября 2022 г., Москва, Россия (устный доклад).

5. Международная конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES-2023», 13–16 июня 2023 г., Москва, Россия (постерный доклад).

6. Международная конференция «Марчуковские научные чтения», 7–11 октября 2024 г., Новосибирск, Россия (устный онлайн доклад).

7. V Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная памяти академика А. М. Обухова, 19–21 ноября 2024 г., Москва, Россия (устный доклад).

8. Всероссийская конференция с международным участием по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES-2025», 23–26 июня 2025 г., Москва, Россия (устный доклад).

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

Личный вклад. Лично автором были выполнены следующие работы:

- программная реализация генератора стохастических возмущений в рамках модели ПЛАВ (доработка разработанного ранее программного модуля);
- реализация и настройка стохастических возмущений параметров и тенденций параметризаций в модели ПЛАВ;
- разработка и реализация различных алгоритмов стохастического возмущения полулагранжевых траекторий и выбор наилучшего из них;
- все приведенные в работе численные эксперименты, а также обработка их результатов (оперативные испытания проводились коллективом авторов).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 3 публикациях [1-3] в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук. Кроме того, соискатель является соавтором 4 прочих статей в журналах из «Белого списка» и 7 тезисов докладов. Получен акт о внедрении технологии ансамблевого прогноза на основе модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением порядка 80 км, куда вошли результаты настоящей диссертационной работы. Получено решение ЦМКП Росгидромета о внедрении технологии глобального ансамблевого прогноза на основе модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением порядка 20 км, куда вошли результаты настоящей диссертационной работы. Получено 2 свидетельства (№ 2021663881 и № 2024687372) о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационная работа выполнена в том числе при поддержке грантов Российского научного фонда 21-71-30023 и 21-17-00254.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 4 приложений. Полный объем диссертации составляет 131 страницу текста с 30 рисунками и 7 таблицами. Список литературы содержит 166 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, формулируется цель, ставятся задачи, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **главе 1** приведен обзор алгоритмов, применяемых для учета неопределенностей, возникающих при моделировании атмосферы, а именно, неопределенностей в начальных данных и в блоках описания адиабатических и неадиабатических процессов в модели атмосферы; а также приведены общепринятые в моделировании атмосферы определения.

Рассмотрены детерминистские и стохастические подходы для учета неопределенностей в моделях атмосферы. К первым относится использование мультимодельных ансамблей, моделей с разными наборами параметризаций, а также разных наборов значений параметров параметризаций. Ко вторым относятся алгоритмы добавления случайного шума в тенденции параметризаций, в отдельные параметры параметризаций, а также различные модификации этих алгоритмов. В блоке решения уравнений динамики атмосферы применяются алгоритмы стохастической параметризации обратного каскада кинетической энергии, а также добавления случайного шума в полулагранжевы траектории.

Параметризация физического процесса — методика описания процессов, не поддающихся точному моделированию из-за недостаточной пространственной или временной разрешающей способности модели атмосферы (процессов, масштабы которых меньше или сопоставимы с шагом расчетной сетки). Параметризация физических процессов подсеточного масштаба — это выражение их в модели атмосферы через представленные в модели переменные, описывающие процессы более крупного масштаба, для определения суммарного действия первых процессов на вторые.

Тенденция прогностической переменной вследствие параметризаций — это изменение её значения за шаг по времени, вычисляемое как сумма правых частей уравнений динамики атмосферы, умноженная на величину шага по времени.

Блок динамики атмосферы — часть программной реализации модели атмосферы, включающая численный алгоритм решения системы уравнений гидротермодинамики атмосферы.

Для дальнейшей реализации в модели ПЛАВ были выбраны алгоритмы стохастического возмущения параметров и тенденций параметризаций, а также полулагранжевых траекторий.

В **главе 2** приводится описание системы ансамблевого прогноза погоды, которая состоит из системы ансамблевого усвоения данных и глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ, развиваемых в ИВМ РАН и Гидрометцентре России.

Раздел 2.1 посвящен системе ансамблевого усвоения данных, которая основана на алгоритме локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля².

В разделе 2.2 описана модель ПЛАВ³. В данном разделе рассказывается, как в модели учитываются основные физические процессы, протекающие в атмосфере, приведены основные уравнения модели, перечислены применяемые параметризации процессов подсеточного масштаба.

В блоке решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ численно решается система трехмерных уравнений динамики атмосферы. Фактически она представляет из себя осредненные уравнения Навье–Стокса на вращающейся сфере в приближении мелкой атмосферы и гидростатики, дополненные уравнением адвекции водяного пара. Для дискретизации по вертикали используется гибридная система координат⁴, которая вблизи земной поверхности огибает рельеф, а начиная с некоторой высоты совпадает с изобарической системой координат.

Для описания процессов подсеточного масштаба в модели ПЛАВ используется набор параметризаций, к таким процессам относятся перенос коротко- и длинноволновой радиации, перенос тепла и влаги в почве и на поверхности земли, глубокая и мелкая конвекция, формирование облаков, а также образование и выпадение осадков, гравитационно–волновое сопротивление при взаимодействии атмосферы с орографией, турбулентность и процессы в атмосферном пограничном слое, а также микрофизические процессы. Результаты

² Hunt et al., *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2007; Shlyayeva et al., *Russ. J. Num. Anal. Math. Model*. 2013.

³ Tolstykh et al., *Geosci. Model Dev*. 2017.

⁴ Simmons et al. *Mon. Wea. Rev.* 1981.

вычислений из параметризаций включаются в виде отдельных слагаемых в правые части системы уравнений динамики атмосферы.

В данной работе рассматривается две версии модели ПЛАВ. Первая из них — ПЛАВ072L96 — имеет пространственное разрешение $0,9^\circ \times 0,72^\circ$ по долготе и широте, 96 уровней по вертикали, высота верхнего уровня составляет примерно 80 км. Вторая версия — ПЛАВ20 — имеет горизонтальное разрешение $0,225^\circ$ по долготе; переменное разрешение по широте — от $0,24^\circ$ во внетропической части Южного полушария до $0,16^\circ$ в средних широтах Северного полушария. По вертикали модель имеет 51 уровень, верхняя граница составляет примерно 36 км.

В разделе 2.3 обсуждаются особенности рассматриваемой системы ансамблевого прогноза погоды. Описан цикл вычисления ансамблевого прогноза погоды, а также приводится применяемый алгоритм центрирования ансамбля анализов на оперативный анализ Гидрометцентра России⁵.

Раздел 2.4 посвящен применяемой в работе ансамблевой системе верификации, разработанной В. Г. Мизяком в Гидрометцентре России и представленной в работе [4]. Верификация ансамблевых прогнозов производится относительно данных оперативных анализов Гидрометцентра России⁵ на сетке с шагом $1,5^\circ$ по долготе и широте (согласно стандарту ВМО⁶) для полей давления на уровне моря, а также температуры, геопотенциала и скорости ветра на разных уровнях во внетропических частях Северного и Южного полушарий и в тропиках.

В **главе 3** рассматриваются стохастические возмущения в блоке параметризаций процессов подсеточного масштаба модели ПЛАВ.

Для системы ансамблевого прогноза погоды на основе модели ПЛАВ без учета неопределенностей модели была характерна недооценка неопределенности, то есть недостаточный разброс ансамбля⁷. Одним из способов повышения разброса ансамбля, а, следовательно, повышения надежности ансамблевых прогнозов, является стохастическое возмущение параметров физических параметризаций либо тенденций.

В разделе 3.1 описан применяемый в работе алгоритм генерации стохастических возмущений. Данный алгоритм похож на алгоритм, применяемый в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП)⁸, но адаптирован с учетом структуры глобальной модели атмосферы ПЛАВ.

Для получения возмущений используется распределение

$$\psi_j \sim \mathcal{N} \left(-\frac{1}{2} \sigma_j^2, \sigma_j^2 \right),$$

где ψ_j — случайное двумерное поле на сетке, значения которого имеют нормальное распределение с математическим ожиданием $E(\psi_j) = -\frac{1}{2} \sigma_j^2$ и стандартным отклонением σ_j . В зависимости от выбора параметра σ_j будет меняться эффективная ширина интервала, в который попадают значения ψ_j .

⁵ Цырульников и др. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019.

⁶ Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Женева : ВМО, 2019.

⁷ Рогутов и др. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ. 2017.

⁸ Ollinaho et al. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2017.

Для получения скоррелированных полей ψ_j по пространству используется фильтрация ψ_j при помощи бигармонического оператора⁹

$$\psi_{j(f)} = \psi_j - \nu \Delta^2 \psi_{j(f)}.$$

Здесь ψ_j — поле до фильтрации, $\psi_{j(f)}$ — поле после фильтрации, Δ^2 — разностный оператор, возникающий в результате дискретизации бигармонического оператора на сфере, ν — коэффициент фильтрации. Коэффициент ν определяет пространственный радиус корреляции полученного поля, однако получить явную связь между этим коэффициентом и величиной радиуса корреляции не представляется возможным, поэтому коэффициент следует подбирать эмпирически. В модели ПЛАВ используется значение коэффициента фильтрации $\nu = (c\Delta\lambda a)^4$, где $\Delta\lambda$ — шаг сетки по долготе в радианах, a — радиус Земли, c — некоторая константа.

Для получения скоррелированных по времени полей используется AR(1)-процесс¹⁰:

$$\psi_j^{n+1} = -\frac{1}{2}\sigma_j^2 \frac{\Delta t}{\tau_j} + \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_j}\right)\psi_j^n + \left[\frac{\Delta t}{\tau_j} \left(2 - \frac{\Delta t}{\tau_j}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \varepsilon_j^n.$$

Здесь Δt — шаг по времени модели, τ_j — время декорреляции, ε_j^n — сгенерированное на данном шаге по времени случайное двумерное поле с распределением $\mathcal{N}\left(-\frac{1}{2}\sigma_j^2, \sigma_j^2\right)$ и заданным радиусом пространственной корреляции (отфильтрованное). Использование AR(1)-процесса, определенного выше, гарантирует, что $E(\psi_j^n) = -\frac{1}{2}\sigma_j^2$ и $\sigma(\psi_j^n) = \sigma_j$.

В модели ПЛАВ реализована возможность настройки амплитуды возмущений в зависимости от высоты. Для этого случайная величина ψ_j умножается на коэффициент $\mu \in [0,1]$. Амплитуда возмущений уменьшается до нуля вблизи поверхности Земли и в стратосфере. Переходная зона находится между высотами 100 и 50 гПа.

Двумерные случайные поля возмущений генерируются независимо для каждого из возмущаемых параметров и тенденций.

В разделе 3.2 говорится об особенностях программной реализации стохастических возмущений тенденций и параметров параметризаций.

Алгоритм стохастического возмущения тенденций параметризаций¹¹:

$$\mathbf{F}_p = (1 + \psi r)\mathbf{F}_c,$$

где $\mathbf{F}_c \Delta t$ — невозмущенная тенденция, $\mathbf{F}_p \Delta t$ — возмущенная тенденция, $\psi \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ — случайная величина с распределением, близким к гауссову, r — коэффициент для настройки амплитуды возмущений на разных вертикальных уровнях.

Данный алгоритм предлагается для возмущения тенденций температуры и завихренности. Тенденция влажности не возмущается, поскольку известно, что её возмущение может приводить к увеличению систематической ошибки¹². Отличительной чертой данного алгоритма является его независимость от модели, за счет чего его несложно реализовать в любой модели атмосферы.

⁹ Berner et al. J. Atmos. Sci. 2009.

¹⁰ von Storch et al. Statistical Analysis in Climate Research. Cambridge University Press, 1999.

¹¹ Buizza et al. Wea. Forecasting. 1999.

¹² Lang et al. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2021.

Алгоритм стохастического возмущения параметров параметризаций¹³:

$$\xi_j = e^{\psi_j \tilde{\xi}_j}, \quad \psi_j \sim \mathcal{N}(\mu_j, \sigma_j^2),$$

где ξ_j — возмущенное значение параметра, $\tilde{\xi}_j$ — невозмущенное значение параметра, ψ_j — случайная величина с гауссовым распределением со средним μ_j и стандартным отклонением σ_j .

Возмущения добавляются к отдельным параметрам параметризаций, имеющим высокую неопределенность, и могут иметь нормальное или логарифмически нормальное распределение с заданными параметрами ($\mu_j = -\frac{1}{2}\sigma_j^2$ или $\mu_j = 0$).

Данный алгоритм является «модельно зависимым», то есть его программная реализация существенно зависит от набора применяемых параметризаций в модели атмосферы.

Раздел 3.3 посвящен выбору возмущаемых параметров и настройке возмущений в версии модели для среднесрочных прогнозов. Всего для возмущения выбрано 2 тенденции и 26 параметров параметризаций. Настройка возмущений каждого из параметров и тенденций производилась эмпирически, критерием настройки было увеличение разброса ансамбля, при этом среднеквадратическая ошибка среднего по ансамблю прогноза должна оставаться неизменной либо уменьшаться.

В разделе 3.4 описаны численные эксперименты и их результаты для ансамблевых среднесрочных прогнозов.

¹³ Ollinaho et al. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2017.

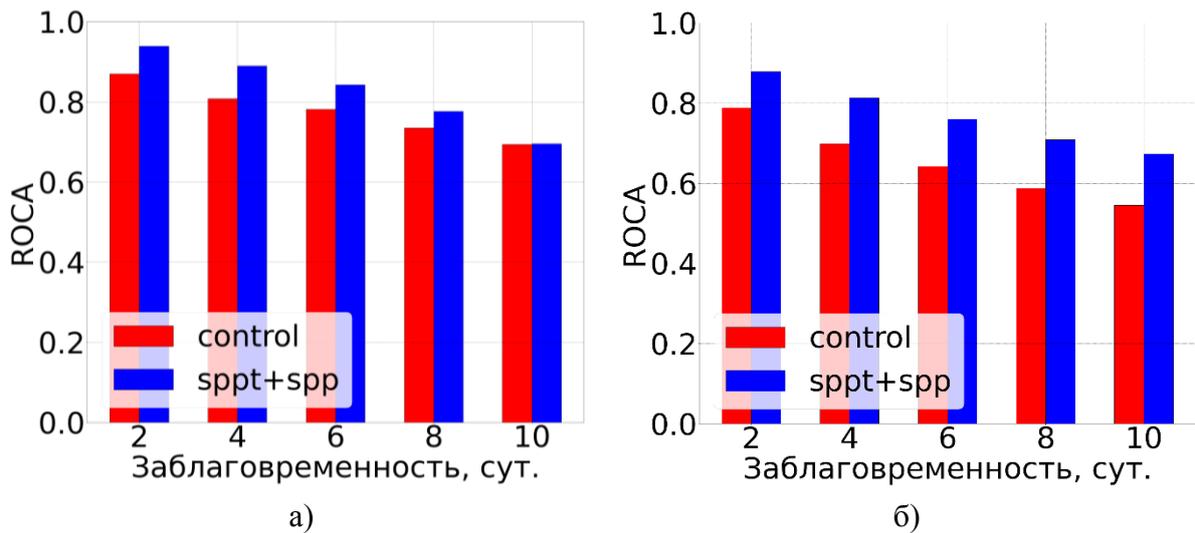


Рис. 1 — Площадь под ROC-кривой (ROCA) для прогноза аномалий давления на уровне моря на 1,5 стандартных отклонения выше климатической нормы (а) и аномалий температуры на уровне 500 гПа на 1,5 стандартных отклонения ниже климатической нормы (б) во внетропической части Северного полушария (20° с. ш. – 90° с. ш.) в среднем за август 2021 и февраль 2022; красный — эксперимент *control*, синий — *sppt+spp*

Используются следующие обозначения экспериментов: *control* — контрольный эксперимент без стохастических возмущений; *sppt+spp* — эксперимент со стохастическим возмущением тенденций и параметров параметризаций. В каждой серии экспериментов вычислялись ансамбли из 41 прогноза с заблаговременностью от 1 до 10 суток для двух разных периодов – август 2021 года и февраль 2022 года, т. е. всего 59 ансамблевых прогнозов. В работах данной главы применяется система ансамблевого прогноза погоды на основе версии модели ПЛАВ072L96 с горизонтальным разрешением $0,9^{\circ} \times 0,72^{\circ}$ по долготе и широте соответственно и 96 уровней по вертикали.

На рисунке 1а представлены значения площади под ROC-кривыми (ROCA) для прогноза положительных аномалий давления на уровне моря на полтора стандартных отклонения выше климатической нормы во внетропической части Северного полушария (20° с. ш. – 90° с. ш.) в среднем за 2 месяца — август 2021 и февраль 2022 года, а на рисунке 1б — аналогичная оценка для прогноза отрицательных аномалий температуры на уровне 500 гПа на полтора стандартных отклонения ниже климатической нормы во внетропической части Северного полушария (20° с. ш. – 90° с. ш.). Площадь под ROC-кривой для идеального прогноза равна 1, а в случае, если она равна 0,5, такой прогноз считается бесполезным и не отличается от случайного угадывания. На графиках заметно повышение ROCA для прогнозов аномалий давления на уровне моря и температуры на уровне 500 гПа во внетропической части Северного полушария в среднем за 2 месяца с заблаговременностью до 10 суток. Качество прогнозов с ростом заблаговременности падает, однако площадь под кривой остается не меньше 0,6–0,7 — такие вероятностные прогнозы считаются полезными. Увеличение площади под ROC-кривой было получено также и для некоторых других переменных во внетропической части Северного полушария.

Раздел 3.5 посвящен применению стохастических возмущений параметров в долгосрочных ансамблевых прогнозах. Для субсезонных прогнозов модели атмосферы

ПЛАВ исследовано влияние применения стохастически возмущаемых параметров в блоке описания процессов подсеточного масштаба. Оказалось, что применение таких возмущений улучшает воспроизведение некоторых интегральных характеристик модельной атмосферы (например, интегральных среднемесячных потоков восходящей тепловой радиации на верхней границе атмосферы) и уменьшает ошибку, например, прогноза приземной температуры в Антарктиде. Эти результаты согласуются с ранее полученными¹⁴. На серии ретроспективных прогнозов показано, что по сравнению с ансамблевыми среднесрочными прогнозами, в которых для достижения необходимой величины разброса ансамбля применяется набор из 26 возмущаемых параметров, для субсезонных прогнозов достаточно возмущать лишь три параметра.

Алгоритмы стохастического возмущения параметров и тенденций параметризаций внедрены в систему ансамблевого прогноза на основе модели ПЛАВ. Данная система была (с соавторами) разработана, испытана и внедрена в качестве оперативной в Гидрометцентре России в 2022 году. Личный вклад автора диссертации в проведение оперативных испытаний заключается в настройке амплитуды стохастических возмущений тенденций и параметров параметризаций, настройке параметров аддитивной инфляции в ансамблевой системе усвоения данных, а также участии в обработке результатов.

В главе 3 личный вклад автора состоял в доработке программной реализации и настройке генератора стохастических возмущений; а также в реализации в глобальной модели атмосферы ПЛАВ алгоритмов стохастического возмущения параметров и тенденций физических параметризаций.

Результаты главы 3 с участием автора опубликованы в работах [1; 2; 4; 5].

Глава 4 посвящена алгоритмам учёта неопределенностей, возникающих при численном решении системы уравнений динамики атмосферы, а именно, при вычислении полулагранжевых траекторий. Все работы и численные эксперименты данной главы проводились с версией модели ПЛАВ20, дополнительно производилось сравнение с ПЛАВ072L96.

В разделе 4.1 показан алгоритм вычисления полулагранжевых траекторий в модели ПЛАВ. В блоке решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ применяется полулагранжев метод¹⁵ для описания переноса (адвекции). Значительная часть этого алгоритма связана с поиском исходных точек полулагранжевых траекторий.

Итерационный процесс поиска исходных точек полулагранжевых траекторий можно записать в дискретном виде как

$$\mathbf{r}_d^{(k+1)} = \mathbf{r}_a - \frac{\Delta t}{2} \left(\mathbf{V}(\mathbf{r}_a, t^n) + \left(2\mathbf{V}(\mathbf{r}_d^{(k)}, t^n) - \mathbf{V}(\mathbf{r}_d^{(k)}, t^{n-1}) \right) \right). \quad (1)$$

Здесь k — номер итерации, n — номер шага по времени, Δt — шаг по времени, d и a — индексы, соответствующие исходной и конечной точкам траектории соответственно, \mathbf{r} — радиус-вектор на сфере, $\mathbf{r} = (\lambda, \varphi)$, где (λ, φ) — это, соответственно, широта и долгота, $\mathbf{V} = (u, v)$ — горизонтальный вектор скорости ветра. Аппроксимация (1) уравнения

¹⁴ Zhu et al. J. Geophys. Res. Atmospheres. 2018.

¹⁵ Staniforth et al. Mon. Wea. Rev. 1991.

траекторий имеет название SETTLS¹⁶. На первой итерации полагаем $\mathbf{r}_d^{(0)} = \mathbf{r}_a$. На последующих итерациях \mathbf{V} в исходной точке находится с помощью интерполяции по пространству.

Для простоты уравнение (1) приводится в декартовых координатах. В итерационном процессе применяются некоторые дополнительные геометрические аппроксимации для учета сферической геометрии и приближения мелкой атмосферы¹⁷.

На каждой итерации вычисляются значения сферических координат исходной точки траектории $\lambda_d, \varphi_d, \eta_d$, после чего происходит интерполяция компонент скорости ветра в обновленную исходную точку. Для сходимости итерационного процесса, как правило, достаточно от 3 до 5 итераций. Количество итераций в описанном выше алгоритме зависит от версии модели ПЛАВ, например, в версии ПЛАВ20 используется 4 итерации¹⁹.

В разделе 4.2 приводятся разработанные варианты алгоритма возмущения полулагранжевых траекторий.

Использование стохастически возмущенных компонент вектора скорости ветра в уравнении (2) приводит к возмущению полулагранжевых траекторий в силу уравнения движения. Стоит отметить, что в данном алгоритме предлагается возмущать лишь компоненты вектора скорости ветра, которые затем используются в уравнении траекторий. При этом вектор скорости ветра, передающийся в уравнение переноса, остается неизменным.

Рассмотрим итерационный процесс для нахождения траекторий, который обсуждался выше.

$$\mathbf{r}_d^{n,(k+1)} = \mathbf{r}_a^{n+1} - \frac{\Delta t}{2} (\mathbf{V}_a^n + 2\mathbf{V}_d^{n,(k)} - \mathbf{V}_d^{n-1,(k)}), \quad (2)$$

$$\eta_d^{n,(k+1)} = \eta_a^{n+1} - \frac{\Delta t}{2} (\dot{\eta}_a^n + 2\dot{\eta}_d^{n,(k)} - \dot{\eta}_d^{n-1,(k)}). \quad (3)$$

Здесь η — вертикальная гибридная координата, « $\dot{\cdot}$ » обозначает производную по времени.

¹⁶ Hortal, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2002.

¹⁷ Толстых и др. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М. : Триада лтд, 2017.

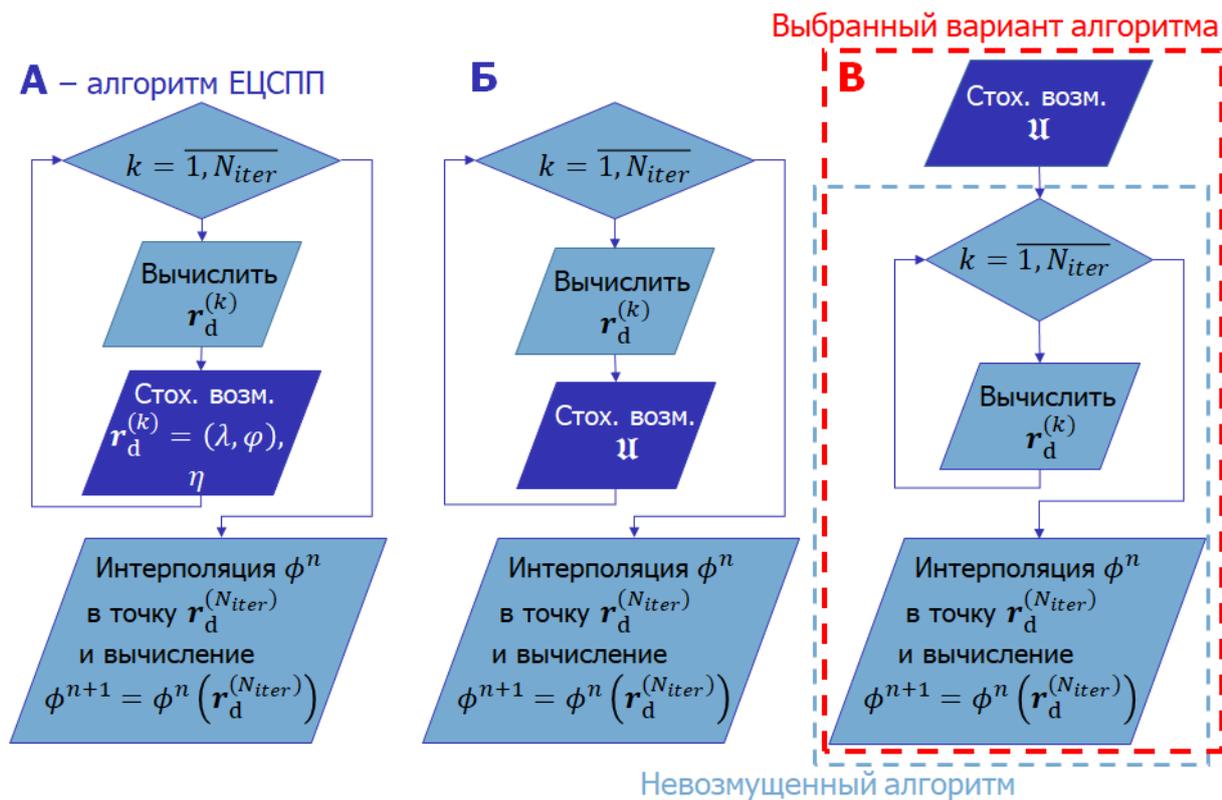


Рис. 2 — Схематическое представление трёх рассмотренных вариантов алгоритма стохастического возмущения полулагранжевых траекторий

В версии **Б** компоненты горизонтального вектора скорости ветра возмущаются внутри итерационного процесса, а в версии **В** — перед решением уравнения (2) итерационным методом. Обозначим выражение в скобках в уравнении (2) через $\mathbf{V}_d^n + 2\mathbf{V}_d^{n,(k)} - \mathbf{V}_d^{n-1,(k)} = \mathbf{u} = (u_u, u_v)$, что соответствует скорости ветра, осредненной вдоль траектории¹⁷. Возмущенные значения компонент вектора \mathbf{u} обозначим (u_u^*, u_v^*) и будем вычислять по формулам:

$$u_u^* = u_u(1 + \xi_u W(\eta)),$$

$$u_v^* = u_v(1 + \xi_v W(\eta)).$$

На рисунке 2 показаны все три рассмотренных варианта алгоритма возмущения полулагранжевых траекторий.

Все три перечисленных алгоритма, которые мы обозначили **А**, **Б** и **В**, были реализованы в модели ПЛАВ. Критерием выбора наиболее подходящего алгоритма была чувствительность разброса (т. е. среднеквадратического отклонения прогнозов в ансамбле от среднего по ансамблю прогноза) прогностического ансамбля к стохастическим возмущениям полулагранжевых траекторий в каждом из алгоритмов. По результатам численных экспериментов алгоритм **В** показал наибольший отклик в разбросе ансамбля и был использован в работе.

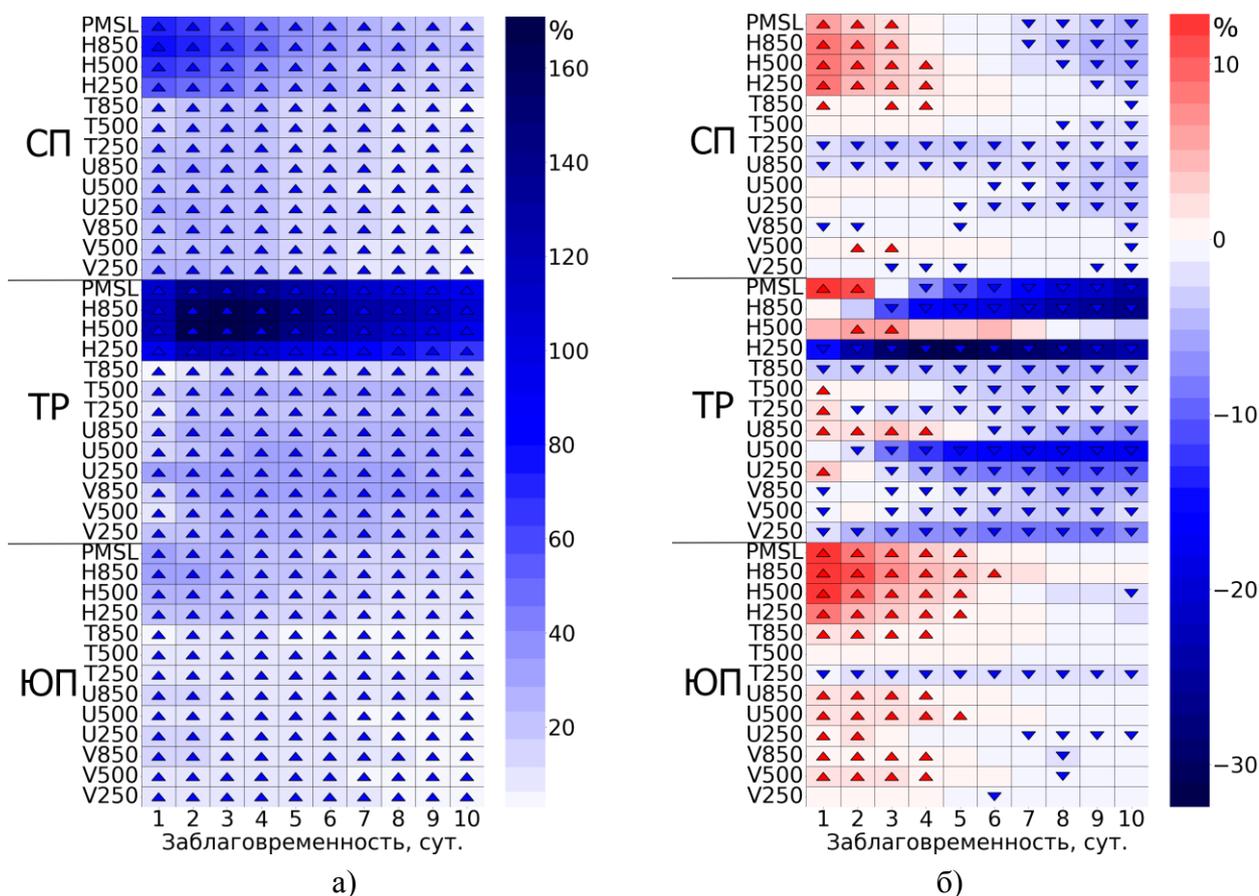


Рис. 3 — Таблицы относительного изменения разброса ансамбля (слева) и непрерывной ранговой вероятностной оценки (CRPS) (справа) в процентах для всего набора верифицируемых переменных в трех регионах земного шара для эксперимента *sppt+spp+dp* относительно эксперимента *sppt+spp* для заблаговременностей от 1 до 10 суток в среднем за 2 месяца (июнь 2024 и январь 2025). Треугольными знаками отмечены те ячейки, отличия в которых статистически значимы с уровнем значимости 95 %.

Обозначения переменных: PMSL — давление на уровне моря, H250 — высота изобарической поверхности 250 гПа, H500 — высота изобарической поверхности 500 гПа, H850 — высота изобарической поверхности 850 гПа, T250 — температура на уровне 250 гПа, T500 — температура на уровне 500 гПа, T850 — температура на уровне 850 гПа, U250 — зональная компонента скорости ветра на уровне 250 гПа, U500 — зональная компонента скорости ветра на уровне 500 гПа, U850 — зональная компонента скорости ветра на уровне 850 гПа, V250 — меридиональная компонента скорости ветра на уровне 250 гПа, V500 — меридиональная компонента скорости ветра на уровне 500 гПа, V850 — меридиональная компонента скорости ветра на уровне 850 гПа.

Раздел 4.3 посвящен описанию численных экспериментов и результатов. Используются следующие обозначения экспериментов: *sppt+spp* — эксперимент со стохастическим возмущением только тенденций и параметров параметризаций; *sppt+spp+dp* — эксперимент со стохастическим возмущением тенденций и параметров параметризаций и полулагранжевых траекторий. В каждой серии экспериментов вычислялись ансамбли из 36 прогнозов с заблаговременностью от 1 до 10 суток для двух разных периодов – июнь 2024 и январь 2025, т. е. всего 61 ансамблевый прогноз. В работах данной главы применяется система ансамблевого прогноза погоды на основе версии модели ПЛАВ20 с горизонтальным разрешением порядка 20 км и 51 уровнем по вертикали.

На рисунках 3а и 3б показаны соответственно таблицы относительного изменения разброса ансамбля и оценки непрерывной ранговой вероятностной оценки CRPS для всего набора верифицируемых переменных для эксперимента со стохастическим возмущением тенденций и параметров параметризаций и полулагранжевых траекторий (*sppt+spp+dp*) по отношению к эксперименту с возмущением только тенденций и параметров параметризаций (*sppt+spp*). Такие таблицы позволяют рассмотреть изменение той или иной оценки прогнозов для всего набора верифицируемых переменных для всех регионов земного шара. В таблицах показано относительное изменение оценки (в процентах) для одного эксперимента относительно другого как функция от заблаговременности прогноза. На оси ординат обозначены верифицируемые переменные и регионы: СП — внетропическая часть Северного полушария (20° с. ш. – 90° с. ш.), ЮП — внетропическая часть Южного полушария (20° ю. ш. – 90° ю. ш.), ТР — тропики (20° ю. ш. – 20° с. ш.), а на оси абсцисс — заблаговременности прогноза в сутках. Обозначения верифицируемых переменных приводятся на подписи к рисунку 3.

На рисунке 3а насыщенность синего цвета соответствует большему увеличению разброса ансамбля в эксперименте *sppt+spp+dp* по сравнению с экспериментом *sppt+spp*. На рисунке 3б аналогично, красный цвет означает увеличение оценки CRPS (то есть снижение качества прогноза), а синий — уменьшение (то есть повышение качества прогноза). Треугольными знаками отмечены те ячейки, отличия в которых статистически значимы с уровнем значимости 95 %. Проверка статистической значимости производилась с помощью критерия Стьюдента¹⁰ для парных выборок.

Из рисунка 3а видно, что для всех переменных во всех регионах наблюдается увеличение разброса ансамбля, причём для некоторых переменных, а именно, для PMSL, H850, H500, H250 в тропиках, увеличение разброса составляет от 100 до 160 % в эксперименте *sppt+spp+dp* относительно эксперимента *sppt+spp*. На рисунке 3б можно заметить снижение CRPS на 10–30 % для большинства переменных для большинства заблаговременностей прогноза, что особенно заметно для всех переменных во внетропической части Северного полушария, а также для PMSL, H850, H250, U500 в тропиках и для T250 во внетропической части Южного полушария. Дополнительное улучшение ансамблевых оценок в тропиках может быть достигнуто путем более тщательной настройки параметризации конвекции в версии модели ПЛАВ20.

Кроме того, в разделе 4.3 было проведено сравнение среднеквадратической ошибки среднего по ансамблю прогноза и разброса ансамбля в текущей оперативной версии системы ансамблевого прогноза на основе модели ПЛАВ072L96 с горизонтальным разрешением 80-100 км и в новой системе ансамблевого прогноза на основе ПЛАВ20 с горизонтальным разрешением 20 км. Показано статистически значимое увеличение разброса ансамбля и снижение среднеквадратической ошибки среднего по ансамблю прогноза для всех переменных во внетропических частях Северного и Южного полушарий, а также для некоторых переменных в тропиках.

Также в разделе 4.3 приводятся результаты оперативных испытаний новой версии системы ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ20, куда

внедрен в числе прочего алгоритм стохастического возмущения полулагранжевых траекторий.

Результаты работ главы 4 с участием автора опубликованы в работе [3].

В **заключении** приведены основные результаты работы.

В **приложении А** приводится список стохастически возмущаемых параметров в модели ПЛАВ.

В **приложении Б** изложены некоторые оценки качества детерминистских и ансамблевых прогнозов.

Приложение В содержит акт внедрения технологии ансамблевого прогноза погоды.

В **приложении Г** представлены полученные свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Заключение

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Стохастическое возмущение параметров и тенденций параметризаций в модели атмосферы ПЛАВ позволило повысить качество ансамблевых среднесрочных прогнозов погоды.

2. Разработан новый вариант алгоритма стохастического возмущения полулагранжевых траекторий в блоке решения уравнений динамики атмосферы; он внедрен в модель ПЛАВ и показал повышение качества ансамблевых среднесрочных прогнозов погоды.

3. Модель ПЛАВ с учетом неопределенностей в параметризациях и блоке динамики атмосферы испытана и внедрена в оперативную систему ансамблевого среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России.

Публикации автора по теме диссертации

4. **Алипова К. А.**, 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 // Rus. J. Numer. Anal. Math. Model. — 2022. — V. 37. — № 6. — P. 331—347.

5. **Алипова К. А.**, Толстых М. А., Фадеев Р. Ю. Применение стохастических возмущений параметров в версии модели ПЛАВ для долгосрочных прогнозов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2024. — Т. 1(391). — С. 6—23.

6. **Алипова К. А.**, Mizyak V. G., Tolstykh M. A., Goyman G. S. Stochastic perturbations in the semi-Lagrangian advection algorithm of the SL-AV global atmosphere model // Rus. J. Numer. Anal. Math. Model. — 2024. — V. 39. — № 1. — P. 1—11.

Прочие публикации автора

7. 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.

8. Толстых М. А., Фадеев Р. Ю., Шашкин В. В., Зарипов Р. Б., Травова С. В., Гойман Г. С., **Алипова К. А.**, Мизяк В. Г., Тищенко В. А., Круглова Е. Н. Модель долгосрочного метеорологического прогноза ПЛАВ072L96 // Метеорология и гидрология. — 2024. — Т. 7. — С. 25—39.

9. Fadeev R. Yu., **Alipova K. A.**, Koshkina A. S., Lapin T. E., Ozerova N. A., Pereladova A. E., Sakhno A. V., Tolstykh M. A. Glacier parameterization in SLAV numerical weather prediction model // Rus. J. Numer. Anal. Math. Model. — 2022. — V. 37. — № 4. — P. 189—201.

10. Толстых М. А., Фадеев Р. Ю., Шашкин В. В., Гойман Г. С., Зарипов Р. Б., Мизяк В. Г., Рогутов В. С., **Алипова К. А.**, Бирючева Е. О. Глобальная модель ПЛАВ10 для среднесрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. — 2025. — Т. 6. — С. 56—66.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. **Алипова К. А.** Программа визуализации результатов верификации ансамбля объективных анализов атмосферы // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021663881. Дата государственной регистрации 25 августа 2021 г.

2. **Алипова К. А.** Программа для визуализации результатов верификации ансамблевых прогнозов для ПЛАВ20 // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024687372. Дата государственной регистрации 18 ноября 2024 г.

