

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-6-36>

УДК 551.509.313

## **О применении ансамблевых методов в краткосрочных региональных прогнозах**

***Е.Д. Астахова<sup>1</sup>, А.Ю. Бундель<sup>1</sup>, Д.Ю. Алферов<sup>1</sup>,  
И.А. Розинкина<sup>1,2</sup>, Г.С. Ривин<sup>1,2</sup>***

*<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр*

*Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*<sup>2</sup>Московский государственный университет*

*имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

*elena\_ast\_hmc@mail.ru*

Разработана иерархическая ансамблевая система краткосрочного прогноза погоды, основанная на негидростатической модели ICON. Глобальная система ICON-Ru-EPS с шагом горизонтальной сетки модели 40 км по глобусу и 20 км по Европейской территории России является источником начальных и граничных условий для региональной системы ICON-Ru2-EPS по территории Центрального федерального округа (ЦФО) с шагом сетки около 2,2 км и явным разрешением глубокой конвекции. Верификация прогнозов по региональной ансамблевой системе ICON-Ru2-EPS с помощью пакета METplus показала высокое качество вероятностных прогнозов и необходимость сочетания разнообразных метрик при анализе результатов. Исследована эффективность метода случайного возмущения параметров схем подсчетных процессов для учета несовершенства модели в ансамблевом прогнозе высокого разрешения по территории ЦФО. Подготовлены рекомендации по выбору возмущаемых параметров и размеру регионального ансамбля.

*Ключевые слова:* региональный ансамблевый прогноз, случайные возмущения параметров, неопределенность модели, негидростатическая модель ICON, верификация ансамблевых прогнозов, пакет METplus

## **On the application of ensemble methods in short-range regional forecasting**

***E.D. Astakhova<sup>1</sup>, A.Yu. Bundel<sup>1</sup>, D.Yu. Alferov<sup>1</sup>,  
I.A. Rozinkina<sup>1,2</sup>, G.S. Rivin<sup>1,2</sup>***

*<sup>1</sup>Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

*<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*elena\_ast\_hmc@mail.ru*

A hierarchical ensemble system for short-term forecasting based on the non-hydrostatic ICON model has been developed. The global ICON-Ru-EPS system with a model horizontal grid step of 40 km over the globe and 20 km over the European part of Russia is a source of initial and boundary conditions for the regional ICON-Ru2-EPS system over the Central Federal District of Russia (CFD) with a grid step of about 2,2 km and explicitly resolved deep convection. A detailed verification of the regional ensemble system ICON-Ru2-EPS was performed using the METplus package. The high quality of probabilistic forecasts was demonstrated as well as the need to combine various metrics when analyzing the results.

The efficiency of the random parameter perturbation method for accounting for model uncertainty in high-resolution ensemble forecasting was investigated for the CFD domain. Recommendations were prepared on the parameters to perturb and on the size of the regional ensemble.

*Keywords:* regional ensemble forecast, random parameter perturbations, model uncertainty, non-hydrostatic ICON model, verification of ensemble forecasts, METplus package

## Введение

Одной из основных проблем в численном прогнозировании погоды является неопределенность, связанная с неточностью начальных и граничных условий для интегрирования атмосферных моделей и несовершенством самих моделей. Ансамблевое прогнозирование позволяет оценить эту неопределенность, используя серию прогнозов с незначительно измененными начальными/граничными условиями и/или моделями, что способствует повышению доверия к прогнозам. Агрегирование результатов множества прогнозов в рамках ансамблевого подхода позволяет частично компенсировать ошибки отдельных прогностических реализаций, тем самым увеличивая точность итогового (среднего по ансамблю) прогноза.

Применение ансамблевых методов в глобальном моделировании началось в конце 20 века [13, 28, 44, 59, 60]. Первоначально методы ансамблевого прогнозирования были использованы для того, чтобы учесть неопределенность прогноза, возникающую за счет неточности начальных данных. Однако дальнейшие исследования показали, что при учете только неопределенности начальных условий разброс ансамбля (корень квадратный из средней дисперсии ансамбля относительно его среднего) оказывается слишком малым (в идеале, разброс ансамбля должен быть статистически согласованным с ошибками ансамблевого среднего и детерминированного прогноза) и необходимо учитывать вклад несовершенства модели [14, 38, 61]. В настоящее время разработан ряд методов учета как неопределенности данных о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности, так и неопределенностей, связанных с моделью [8, 14, 16, 17, 19, 29, 30, 36, 38, 39, 47, 55, 58, 61, 69, 70, 71]. Глобальные ансамблевые системы используются во всех основных мировых прогностических центрах для составления прогнозов на срок от 3 до 14 дней и в основном предназначены для описания неопределенностей, возникающих за счет бароклинной неустойчивости синоптического масштаба. (Применение ансамблей в долгосрочных, сезонных и субсезонных прогнозах в данной статье не рассматривается.)

Однако неопределенности возникают и на меньших пространственно-временных масштабах. Кроме неопределенностей, проявляющихся на региональных масштабах и являющихся следствием явлений более крупного масштаба (например, штормы, связанные с быстрым циклогенезом), имеется значительная неопределенность в локальной погоде. Локальные эффекты и надежность их предсказания интересны пользователям, желающим получать ежедневную оперативную информацию о таких параметрах, как приземная температура, скорость и порывы ветра, продолжительность,

количество и тип осадков, время и место их выпадения, облачность нижнего яруса, видимость. Эти параметры характеризуются большой пространственно-временной изменчивостью.

В последнее время для повышения точности и надежности прогнозов погоды на небольших территориях активно разрабатываются мезомасштабные региональные ансамблевые системы. Прогнозы этих систем особенно ценны для предсказания редких и экстремальных погодных явлений, таких как сильные штормы, ливни и торнадо, которые могут привести к серьезным последствиям.

Для того, чтобы корректно описать неопределенности прогноза на коротких интервалах времени и на мезо-бета (20–200 км) и мезо-гамма (2–20 км) масштабе, ансамблевые системы должны отвечать следующим требованиям [11, 68]:

- модель, используемая в системе ансамблевого прогноза, должна иметь достаточно высокое разрешение;

- масштаб возмущений начальных условий должен соответствовать масштабу изменчивости, описываемой мезомасштабной моделью;

- возмущения, вносимые в начальные условия, должны давать эффект с самого начала прогноза и отражать неопределенность анализа;

- возмущения модели должны быть адекватно учтены, так как в случае мезомасштабного прогнозирования их учет может оказаться даже более важным, чем учет неопределенности начальных условий [15, 66];

- возмущения боковых граничных условий должны быть согласованы с возмущениями начальных условий. Это требование не всегда удовлетворяется, однако ряд авторов показывает, что его выполнение приводит к улучшению качества прогноза [35, 68] и позволяет избежать возможных неустойчивостей. Однако в этом вопросе нет однозначных рекомендаций. Например, по результатам экспериментов с системой AROME-EPS (шаг сетки 2,5 км) Бутье с соавторами [10] сделали вывод, что согласованность начальных и граничных возмущений незначительна с метеорологической точки зрения. Одновременно авторы подчеркнули перспективность использования ансамблевой системы усвоения данных для подготовки начальных условий для ансамбля. Подобной позиции придерживается и Немецкая служба погоды (Deutscher Wetterdienst, DWD). Разработанная немецкими учеными система ICON-D2-EPS использует начальные условия, подготовленные системой усвоения данных KENDA [53], основанной на применении локального ансамблевого фильтра Калмана с трансформацией ансамбля (LETKF, local ensemble transform Kalman filter), тогда как граничные условия являются даунскейлингом результатов глобальной системы [42].

Региональные ансамблевые системы были разработаны и реализованы во многих прогностических центрах. Одной из первых систем была американская мульти-анализная и мульти-модельная система SREF [56], использовавшая несколько моделей с шагом горизонтальной сетки около 80 км,

что в несколько раз больше, чем шаг сетки в современных глобальных ансамблевых системах (9 км в системе IFS [37]). В дальнейшем ансамблевый подход неоднократно применялся для описания региональных процессов, при этом сначала использовались модели с шагом горизонтальной сетки 7–30 км [11, 22, 41, 45, 46, 67]. Развитие региональных ансамблевых систем чрезвычайно важно в связи с быстрой потерей предсказуемости на этих масштабах [31, 64]. Во втором десятилетии 21 века началось активное развитие ансамблевых систем для ограниченной территории, использующих модели с шагом горизонтальной сетки 1–3 км, что дает возможность явным образом (не параметрически) описать (хотя и не полностью) процессы глубокой конвекции [10, 25, 33, 34, 48, 49].

Внедрение и развитие мезомасштабных ансамблевых систем прогнозирования в разных странах и регионах способствует повышению готовности к экстремальным погодным условиям и минимизации их потенциального воздействия на общество и экономику.

В данной статье приводится описание разработанной в Гидрометцентре России иерархической ансамблевой системы, использующей негидростатическую модель ICON [62] и состоящую из глобального (с шагом горизонтальной сетки 40 км по глобусу и 20 км по Европейской территории России) и региональных компонентов (с шагом сетки около 2,2 км, позволяющим явно описать глубокую конвекцию). Система предназначена для краткосрочного прогноза. В первом разделе работы приводится краткое описание модели ICON, во втором разделе обсуждается организация ансамблевой системы и применяемые возмущения модели. Третий раздел посвящен описанию численных экспериментов с региональной ансамблевой системой и результатов их верификации. В четвертом разделе анализируется качество воспроизведения региональной ансамблевой системой случая резкого изменения погоды. В заключении приводятся основные выводы о качестве разработанной ансамблевой системы и обсуждаются пути дальнейшего ее развития.

## 1. Краткое описание модели ICON

Базовой моделью для ансамблевой системы является модель ICON [62]. Основными преимуществами ICON являются точное локальное сохранение массы, согласованный по массе перенос трассеров, возможность использования вложенных сеток [63] и применение негидростатических уравнений в глобальных доменах. Применение метода вложений (nesting) позволяет при интегрировании глобальной модели с фиксированным шагом сетки одновременно дополнительно проводить вычисления в некоторой области (вложенном домене) с более высоким горизонтальным разрешением, учитывая при этом взаимодействие процессов в глобальном и вложенном доменах. Особенностью модели также является возможность так называемого вертикального вложения, позволяющего уменьшить число вертикальных уровней во вложенном домене с целью экономии

компьютерных ресурсов. Динамическое ядро ICON сформулировано на икосаэдральной треугольной сетке Аракавы С. В модели учтены основные физические процессы в атмосфере и на подстилающей поверхности. Модель содержит обширный пакет параметризаций, выбор применяемых физических схем и их параметров зависит от конфигурации модели. Модель была разработана сотрудниками Немецкой службы погоды и Институтом метеорологии Макса Планка и хорошо зарекомендовала себя при решении задач прогноза погоды и климата на разных пространственно-временных масштабах [23, 27, 32, 40]. Модель ICON применяется для оперативных детерминированных и вероятностных прогнозов в Немецкой службе погоды как для глобуса, так и для регионов (оперативная конфигурации системы приведена в [51]). На момент написания настоящей статьи детерминированные прогнозы в Немецкой службе погоды выпускались с помощью глобальной модели ICON с шагом горизонтальной сетки 13 км по всему глобусу и 6,5 км по территории Европы, при этом число уровней по вертикали было 120 и 74 соответственно. Ансамблевые прогнозы выполнялись на более грубой горизонтальной сетке – 26 км по всему глобусу и 13 км по Европе. Заметим, однако, что в своей работе мы опирались на более старую конфигурацию ансамблевой системы DWD, использовавшую шаг сетки 40 км по глобусу и 20 км по Европе. Версии модели ICON с шагами сетки 1 км и больше используются для прогнозов по ограниченной территории как в Немецкой службе погоды, так и в других странах-участницах консорциума COSMO [42, 50].

## 2. Организация системы ансамблевого прогноза

Конечной целью работы было создание мезомасштабной региональной ансамблевой системы прогноза с шагом сетки 2,2 км, однако для достижения этой цели пришлось разработать ряд компонентов, которые в совокупности формируют иерархическую систему ансамблевого прогноза. Она объединяет несколько ансамблевых систем для описания процессов разных масштабов, все системы основаны на использовании одной и той же модели ICON. Система с более грубым разрешением является источником данных для системы с более подробным разрешением. Схематически основные компоненты иерархической системы ансамблевого прогноза и потоки информации представлены на рис. 1.

Необходимость такой организации ансамблевой системы была обусловлена тем, что на момент выполнения работы глобальные ансамблевые системы, использованные для среднесрочного прогноза в Гидрометцентре России, имели шаг сетки около 70 км [2, 6, 43], что не давало возможности применить их результаты в качестве начальных и граничных условий для региональной модели с шагом сетки 2,2 км (для этого отношение шагов по пространству в глобальной и региональной моделях не должно превышать 5–10). Поэтому для генерации начальных и граничных условий для мезомасштабной ансамблевой системы была реализована глобальная

система краткосрочного ансамблевого прогноза ICON-Ru-EPS на основе модели ICON с шагом сетки 20 км по Европейской территории России. Ниже (см. раздел 2.1) приводится описание ее особенностей и характеристик.



**Рис. 1.** Иерархическая ансамблевая система прогноза. Слева – схематическое изображение организации иерархической ансамблевой системы, справа – домены ее компонентов. Область вложенного домена RU ограничена красной линией, а область интегрирования системы ICON-Ru2-EPS (ЦФО) – голубой.

**Fig. 1.** The hierarchical ensemble prediction system: a schematic representation (left panel) and integration domains (right panel). The nested domain RU is indicated by the red line, while the ICON-Ru2-EPS domain (the Central Federal District) is bounded by the light blue line.

Для работы модели ICON в каждой из рассматриваемых областей (глобус, вложенный домен RU, область ЦФО) для каждого разрешения (шаг сетки 40; 20; 2,2 км) потребовалось создать специальные файлы, характеризующие сетку модели, а также подготовить необходимые климатологические параметры и морфометрические характеристики земной поверхности, используемые в дальнейших расчетах. Эта задача была решена с помощью специального веб-интерфейса, предоставляемого Немецкой службой погоды на сайте <https://webservice.dwd.de/cgi-bin/spp1167/webservice.cgi>.

## 2.1. Глобальная система краткосрочного ансамблевого прогноза ICON-Ru-EPS

Начальные возмущенные данные для глобальной системы ансамблевого прогноза подготавливались в DWD с помощью ансамблево-вариационного усвоения данных и передавались в Росгидромет в оперативном режиме в рамках двустороннего сотрудничества между метеорологическими службами России и Германии. Применялся метод инкрементного

обновления анализа [9], позволяющий уменьшить спин-ап (spin-up) модели в начале прогноза. Необходимые для реализации этого метода поля прогнозов и инкрементов анализа поступали из DWD. Модель начинала счет с поля первого приближения за 1,5 часа до срока анализа  $t$ , а в течение последующих трех часов модельного времени к прогностическим полям постепенно добавлялись инкременты анализа. Вычисления во вложенном домене RU начинались в момент времени  $t$ .

В Гидрометцентре России выполнялся глобальный ансамблевый прогноз на 54 часа с помощью модели ICON с шагом сетки 40 км по всему глобусу и 20 км по Европейской территории России (вложенный домен RU, рис. 1). В модели использовалось 90 уровней по вертикали, высота верхнего уровня – 75 км. С целью экономии компьютерных ресурсов во вложенном домене RU использовалось 60 уровней, верхний уровень располагался на высоте около 22 км. Размер ансамбля – 21 реализация. Несовершенство модели атмосферы учитывалось с помощью возмущения параметров физических схем (подробнее в разделе 3). Набор физических параметризаций и настройки возмущений модели были аналогичны применяемым в оперативных глобальных ансамблевых прогнозах DWD на момент проведения численных экспериментов.

В ходе работы глобального ансамбля генерировались возмущенные начальные и граничные условия для мезомасштабного ансамбля, предназначенного для прогноза с высоким пространственным разрешением по области Центрального федерального округа. Чтобы по возможности избежать слишком сильных различий в горизонтальных разрешениях глобальной и региональной версии модели, мы опирались на данные, полученные для вложенного домена RU с шагом сетки 20 км. Так как известно, что качество описания как крупномасштабных, так и возникающих на их фоне мелкомасштабных процессов в региональных ансамблевых системах зависит от частоты обновления граничных условий для мезомасштабной модели [57], то было решено подготавливать граничные условия ежечасно.

## **2.2. Система ансамблевого прогноза по ограниченной территории ICON-Ru2-EPS**

Начальные и граничные условия для мезомасштабного прогноза подготавливались на основе динамического даунскейлинга результатов глобальной системы ICON-Ru-EPS с шагом сетки 20 км.

Динамический даунскейлинг, при котором используются результаты прогнозов по ансамблевой системе более грубого разрешения, глобальной или региональной, является одним из наиболее простых и популярных подходов к генерации возмущенных начальных и граничных условий для мезомасштабных ансамблей [22, 33, 46]. Преимуществом этого подхода является согласованность начальных и граничных возмущений, а недостатком – отсутствие в возмущениях мелкомасштабных структур. В работе [65]

показано, что мелкомасштабные возмущения начальных условий оказывают влияние при малых заблаговременностях прогнозов (до 12 час), при этом эффект сильно зависит от процессов синоптического масштаба в районе, окружающем область интегрирования мезомасштабной модели. При использовании динамического даунскейлинга проходит около 5–12 часов (период спин-апа), прежде чем в возмущениях прогнозов появляются мелкомасштабные структуры, что негативно влияет на качество вероятностных прогнозов в начале интегрирования модели. В настоящее время активно разрабатываются методы генерации возмущений для мезомасштабных ансамблей, основанные на сочетании крупномасштабных возмущений из системы грубого разрешения и мелкомасштабных возмущений, полученных из мезомасштабной системы усвоения данных [25, 42, 68]. Использование таких подходов не входило в задачу данного исследования, возможность их применения в Гидрометцентре России будет рассмотрена в ходе дальнейших работ.

В разработанной региональной ансамблевой системе шаг сетки по горизонтали был равен 2,2 км. Использовались 65 уровней по вертикали до высоты около 22 км и шаг по времени 24 сек. Область интегрирования покрывала практически всю территорию ЦФО (см. рис. 1). В дальнейшем для системы используется обозначение ICON-Ru2-EPS.

В экспериментах с региональным ансамблем его размер менялся от 21 до 15. Как и в глобальном ансамбле, несовершенство модели атмосферы учитывалось с помощью возмущения параметров физических схем, однако набор возмущаемых параметров, способ и диапазон возмущения отличались (подробнее в разделе 3).

### **3. Численные эксперименты и верификация их результатов**

#### **3.1. Организация численных экспериментов**

С помощью разработанной иерархической системы ансамблевого прогноза были выполнены численные эксперименты для периода 17–28 февраля 2022 года с целью оценки качества регионального вероятностного прогноза, влияния размера ансамбля и роли возмущений модели. Дополнительно ставилась задача продолжить работы, представленные в [5], и более подробно оценить возможности системы METplus [12] для верификации ансамблевых прогнозов высокого разрешения.

Как в глобальной, так и в региональной ансамблевой системе неопределенность прогнозов за счет несовершенства модели атмосферы учитывалась с помощью случайных возмущений настроечных параметров схем, описывающих физические процессы подсеточного масштаба [51]. Выбор возмущаемых параметров и диапазона их возмущений был основан на рекомендациях разработчиков модели ICON и специалистов, занимающихся созданием и тестированием схем физических параметризаций [54], и зависел от конфигурации системы. Возмущения вносились в настроечные

параметры схем, описывающих влияние орографии подсеточного масштаба, торможения гравитационных волн, микрофизических процессов, радиации и облачности, турбулентности, конвекции и поверхностных процессов. Большинство параметров возмущалось аддитивно с помощью формулы

$$\theta_{pert} = \theta_{ref} + 2(v - 0.5) \cdot \theta_{range} ; v \in [0, 1], \quad (1)$$

где  $\theta_{ref}$  – невозмущенное значение параметра;  $\theta_{pert}$  – его возмущенное значение;  $\theta_{range}$  – величина, определяющая диапазон возможных изменений (возмущений) параметра;  $v$  – псевдослучайное число, генерация которого выполнялась с учетом номера ансамблевой реализации. Для небольшого количества параметров применялось мультипликативное возмущение. Чтобы избежать физически нереальных ситуаций, возмущения некоторых параметров были коррелированы, что достигалось путем использования для них одинаковых псевдослучайных чисел.

В глобальной системе ICON-Ru-EPS варьировалось 36 параметров. Возмущения рассчитывались по формуле (1) на каждом шаге модели. Для определения величины  $v$  из равномерного распределения выбиралось псевдослучайное число, на которое дополнительно накладывались синусоидальные вариации со случайной фазой, зависящей от модельного времени. Настройки возмущений модели совпадали с применяемыми в глобальной ансамблевой системе DWD на момент проведения экспериментов.

Для региональной системы были выполнены четыре численных эксперимента: без возмущений модели (NOPERT) и с различными наборами возмущаемых параметров и разными распределениями возмущений (ASGLOB, ASLAM, MIX). Во всех экспериментах использовались возмущенные начальные и граничные условия. В эксперименте ASGLOB использовались настройки возмущений модели, аналогичные примененным в глобальной системе. Возмущения в эксперименте ASLAM были близки к применяемым в региональной версии ансамблевой системы DWD. Рассматривалось 19 параметров и предполагалось дискретное распределение их возмущений – с вероятностью 50 % выбиралось значение параметра по умолчанию, с вероятностью 25 % – верхняя или нижняя граница заранее заданного диапазона изменения соответствующего параметра. Значения  $v$  в формуле (1) зависели от параметра, номера прогностической реализации и времени старта прогноза. Возмущения параметров рассчитывались в начале прогноза и оставались в дальнейшем неизменными. Для ряда параметров размер возмущений отличался от использованного в эксперименте ASGLOB. В эксперименте MIX варьировалось 25 параметров, выбранных авторами из возмущаемых в глобальной версии. Возмущения генерировались так же, как и в эксперименте ASLAM.

Региональные ансамблевые прогнозы выпускались по срокам 00 и 12 ч ВСВ на 48 часов. Результаты прогнозов обрабатывались с помощью системы постпроцессинга FieldExtra [20]. Визуализация результатов

прогнозов на регулярной широтно-долготной сетке осуществлялась с помощью пакета «Изограф» [1]. Для верификации использовался пакет METplus [12].

По результатам численных экспериментов было оценено качество прогноза и проанализировано влияние на прогноз возмущений модели и размера ансамбля.

### 3.2. Особенности верификации

Система верификации является неотъемлемой частью системы ансамблевого прогноза. Для ансамблевого прогноза задача верификации оказывается сложнее, чем для детерминированного прогноза, так как имеет большую размерность [72]. Для верификации вероятностных прогностических систем разработан ряд скалярных метрик, однако каждая из них сама по себе не в состоянии полностью описать качество прогноза. Поэтому приходится использовать совокупность метрик, чтобы оценить такие характеристики системы (атрибуты прогноза), как точность, разрешение, дискриминирующая способность, надежность, смещение.

Оценки **точности** системы показывают соответствие прогноза наблюдению в каждой паре прогноз-наблюдение, с осреднением по достаточно большому количеству случаев. Примерами оценок точности являются *среднеквадратическая ошибка RMSE* и *абсолютная ошибка MAE*. В случае ансамблевого прогноза их, как правило, рассчитывают для среднего по ансамблю. Известно, что оценки качества среднего по ансамблю обычно оказываются лучше, чем для детерминированного прогноза с тем же разрешением – в основном за счет осреднения случайного шума в прогнозе [18, 20]. Однако в результате осреднения могут пропадать локальные специфические особенности прогнозируемых полей. Поэтому обычно оценки качества среднего по ансамблю используются как показатель адекватности построения ансамблевой системы и, в частности, применяемых в системе возмущений. Важной метрикой, показывающей, сколь хорошо построен ансамбль, является *разброс прогнозов в ансамбле* (далее – разброс), определяемый как среднеквадратическое отклонение всех прогнозов от среднего. Разброс должен соответствовать ошибке прогноза, подробное обсуждение причин этого соответствия можно найти в [61, 52]. При рассмотрении качества ансамблевых систем обычно анализируют агрегированные по пространству среднеквадратические ошибки среднего и разброс ансамбля для большого интервала времени в зависимости от заблаговременности прогноза. В идеале как значения, так и временной ход этих двух характеристик должны быть близки. Для вероятностных прогнозов аналогом *среднего квадрата ошибки, MSE* (квадрата RMSE), является *оценка Брайера BS* [72], характеризующая ошибку прогноза вероятности. BS определяется для отдельных явлений (например, превышение какого-то порогового значения). Качество прогноза по отношению к эталонному

прогнозу (часто в качестве эталона используют выборочную климатологию – т. е. среднюю частоту явления в выборке по данным наблюдений) оценивают с помощью *меры мастерства Брайера BSS*.

Также для оценки **точности** прогноза вероятностей часто применяют *непрерывную ранговую вероятностную оценку CRPS*, являющуюся обобщением MAE на случай вероятностных прогнозов и характеризующую соответствие кумулятивных функций распределения прогноза и наблюдений. Интеграл от BS по всем пороговым значениям дает CRPS.

Атрибут **смещение** показывает соответствие среднего по прогнозу среднему по наблюдениям. *Средняя ошибка ME* является мерой смещения для прогнозов непрерывных величин

Важными атрибутами прогностической системы являются **надежность** и **разрешение**. **Надежность** характеризует распределение наблюдений при условии конкретных значений прогноза. В случае ансамблевых прогнозов надёжность показывает, насколько предсказанная вероятность события соответствует его наблюдаемой частоте при осреднении по всем случаям, для которых был выдан этот прогноз. При высокой надёжности, если прогнозируется вероятность события 40 %, то оно и должно наблюдаться в 40 % случаев, для которых был выполнен этот прогноз. **Разрешение** также связано со значениями наблюдений при условии конкретных значений прогноза, однако, в отличие от надёжности, оно показывает, насколько сильно различаются средние значения наблюдений при разных значениях прогнозов. Прогноз с хорошим разрешением может отделить один тип явления от другого. Если при прогнозе температуры, равной 10 и 20 градусам, средние наблюдаемые температуры существенно отличаются друг от друга, то система обладает высоким разрешением. Даже если прогноз неверный, но при этом может отделить один тип явления от другого, то считается, что система обладает разрешающей способностью. Надежность и разрешение ансамблевого прогноза обычно характеризуют с помощью различных компонент оценки Брайера BS. Оценку CRPS, аналогично BS, также можно разделить на компоненты *разрешение, надёжность и неопределенность* [26].

**Дискриминирующая способность** обратна разрешению в том смысле, что показывает различие распределений прогнозов при условии разных конкретных значений наблюдений. Она характеризует возможности системы различать два возможных альтернативных варианта, например, будет ли дождь или снег, превысит ли аномалия температуры климатические значения более, чем на 1 стандартное отклонение или нет, и т. п. Дискриминирующую способность ансамблевой системы описывает, например, *сравнительная оперативная характеристика ROC*. Ее удобно представлять в виде графика и анализировать площадь под полученной кривой (ROCA).

Подробное описание перечисленных выше метрик и способы их вычисления представлены в [4, 72].

Удобным инструментом для решения задачи верификации ансамблевого прогноза является пакет METplus [12], примененный в настоящей работе и позволяющий рассчитать метрики, определяющие различные атрибуты прогностических систем.

### 3.3. Результаты верификации ансамблевых прогнозов по системе ICON-Ru2-EPS

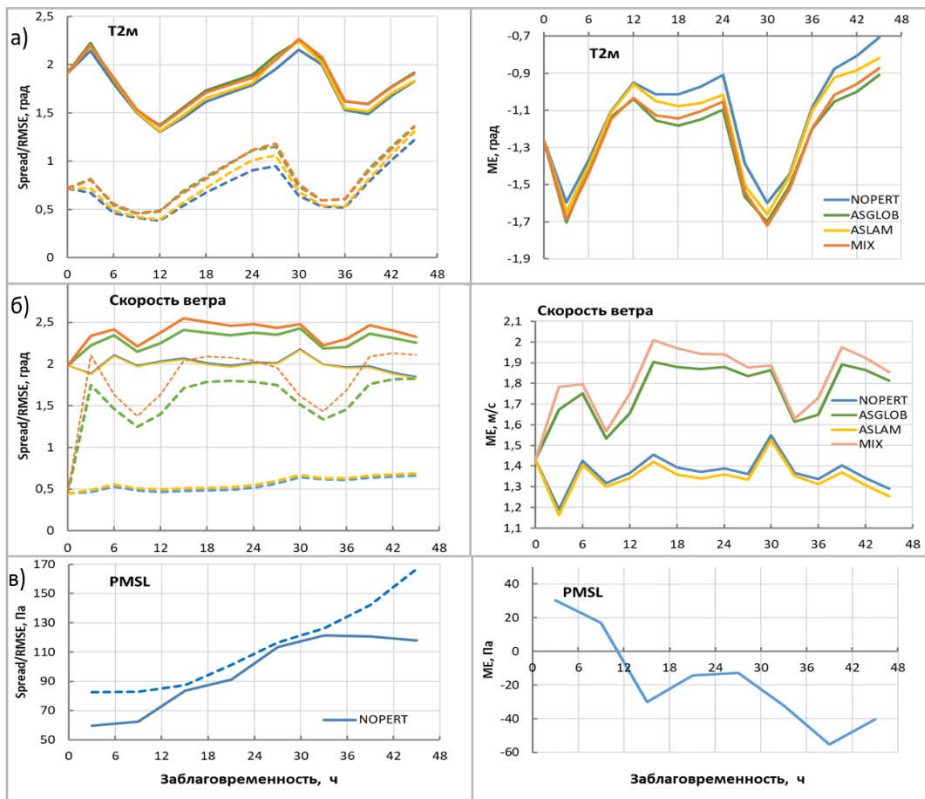
Представленные ниже результаты верификации получены с помощью агрегации упомянутых в разделе 3.2 оценок за каждый день и заблаговременность за период 17–28 февраля 2022 г. для четырех экспериментов, описанных в разделе 3.1. Область агрегации – модельный домен ICON-Ru2-EPS, соответствующий ЦФО (рис. 1). Верификация проводилась относительно данных наблюдений на синоптических станциях. Результаты ансамблевых прогнозов были представлены на регулярной широтно-долготной сетке с шагом 0,02 градуса. Сеточные данные прогноза температуры, давления на уровне моря, приземной скорости и порывов ветра, а также осадков приводились в точки наблюдения с помощью метода “ближайшего соседа”. В работе представлены результаты верификации прогнозов по сроку 00 ч ВСВ.

#### 3.3.1. Точность среднего по ансамблю и разброс

Рис. 2 демонстрирует качество средних по ансамблю прогнозов температуры на уровне 2 м и скорости ветра на уровне 10 м. Сплошными линиями показаны среднеквадратические (слева) и средние (справа) ошибки для всех экспериментов. В целом, качество прогнозов средних по ансамблю величин достаточно высоко, например, RMSE для температуры на уровне 2 м меняется от 1,4 до 2,2 К, что меньше соответствующей ошибки в зимний период для модели COSMO [5]. В среднем по ансамблю приземная температура моделируется лучше в дневные часы, чем в ночные, что согласуется с результатами верификации модели ICON в странах консорциума COSMO [24]. Температуры на уровне 2 м оказались заниженными, о чем свидетельствуют отрицательные значения ME. Возможно, это связано с достаточно теплой погодой на большей части ЦФО в рассматриваемый период и несовершенством схем параметризации поверхностных процессов при таянии снега [3].

Важной характеристикой ансамбля является разброс прогнозов относительно среднего по ансамблю, который представлен пунктиром на левой панели рис. 2. Разброс должен статистически соответствовать ошибке прогнозов, однако в эксперименте NOPERT (с возмущениями только начальных и граничных данных) система ICON-Ru2-EPS демонстрирует заниженные значения разброса по сравнению с RMSE для всех рассмотренных метеорологических величин, за исключением давления, приведенного к уровню моря, PMSL (так как возмущения модели практически не влияют

на прогноз этой характеристики, то на нижней панели рис. 2 показаны результаты только для эксперимента NOPERT). Возможно, это связано с тем, что давление на уровне моря в большей степени определяется процессами синоптического масштаба в атмосфере, нежели процессами у поверхности.



**Рис. 2.** Качество среднего по ансамблю прогноза (сплошная линия, левая панель RMSE, правая – ME) и разброс (левая панель, пунктир) для температуры на уровне 2 м (а), скорости ветра на уровне 10 м (б) для различных вариантов возмущения модели (здесь и далее: синий – NOPERT, зелёный – ASGLOB, желтый – ASLAM, оранжевый – MIX), а также для давления на уровне моря (в) в эксперименте NOPERT.

**Fig. 2.** Verification scores for ensemble mean 2-m temperature (a) and 10-m wind speed (б) in experiments with various model perturbations (here and further blue for NOPERT, green for ASGLOB, yellow for ASLAM, and orange for MIX) complemented by the scores for mean sea level pressure in NOPERT (в). Solid lines stand for RMSE (left panel) and ME (right panel). The spread is shown in dashed lines.

Известно, что глобальные ансамблевые системы показывают хорошее соответствие разброса и ошибки в свободной атмосфере, но для приземных характеристик оно оказывается хуже. Для региональных ансамблевых

систем, сфокусированных на прогнозе приземных характеристик, недостаточность разброса температуры и скорости ветра у поверхности является общей и крайне нежелательной чертой.

Одним из способов увеличить разброс ансамбля и улучшить его соответствие ошибке среднего является учет несовершенства модели [14, 38]. Вносимые для этого в модель возмущения (которые были применены в экспериментах ASLAM, ASGLOB, MIX) не должны ухудшать качество среднего по ансамблю прогноза. Однако это требование в полной мере удовлетворяется только в ASLAM (этот вариант в дальнейшем рассматривался как основной). Результаты экспериментов ASGLOB и MIX показывают увеличение RMSE и ME, незначительное для температуры и существенное для ветра. При этом для приземного ветра нежелательное ухудшение качества прогноза среднего по ансамблю в экспериментах ASGLOB и MIX сочетается с такой востребованной тенденцией, как рост разброса.

С целью понять причины такого поведения ошибки и разброса в прогнозируемой скорости ветра на уровне 10 м были проанализированы различия в наборах параметров, возмущаемых в ASLAM, ASGLOB и MIX, и выполнены дополнительные численные эксперименты по варьированию отдельных параметров. Оказалось, что наблюдаемые эффекты в основном связаны с аддитивными возмущениями параметра *gkwake*, влияющего на торможение горизонтального потока за счет подсеточной орографии. Расширение диапазона возможных значений этого параметра при его возмущении в экспериментах ASGLOB и MIX привело к систематическому росту скорости ветра в приземных слоях. Изменение типа возмущений этого параметра с аддитивного на мультипликативный позволило устранить систематические ошибки, наблюдаемые в этих экспериментах, однако сопровождалось сильным уменьшением разброса. Замена аддитивных возмущений на мультипликативные в ASLAM привела к незначительному дополнительному разбросу (не представлено). Полученные результаты свидетельствуют о большой чувствительности модели к параметрам схемы описания эффектов подсеточной орографии и целесообразности дальнейшей настройки как самого параметра *gkwake*, так и диапазона, и типа его возмущений. Высокая чувствительность прогнозируемой скорости ветра к вариациям этого параметра была также отмечена в [7].

Слабые различия между разбросом только за счет возмущения начальных и граничных условий (эксперимент NOPERT) и за счет дополнительного возмущения модели (ASLAM) показывают недостаточную эффективность схемы случайных возмущений параметров, реализованной в модели ICON, для такой небольшой области, как ЦФО. Заметим, что в данной схеме возмущения параметров одинаковы для всех точек горизонтальной сетки и на всех высотах. В дальнейшем предполагается рассмотреть возможность применения не констант, а меняющихся в пространстве и времени случайных полей возмущений, или метода стохастических возмущений физических тенденций [14].

### 3.3.2. Вероятностные оценки

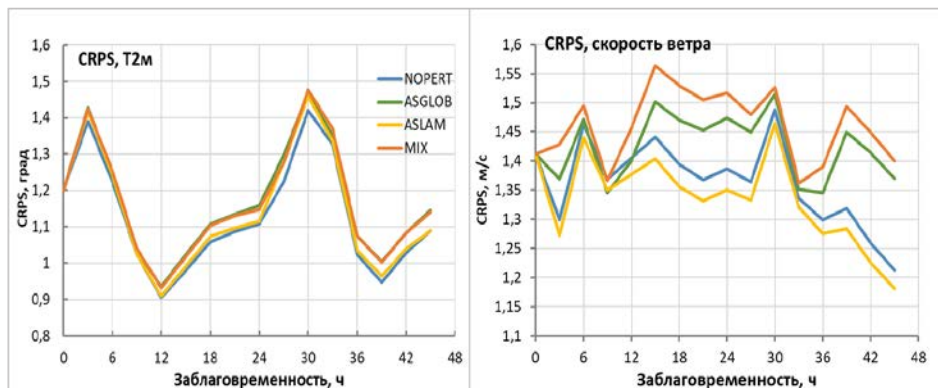
Непрерывная ранговая вероятностная оценка CRPS проста для интерпретации и часто применяется для общей характеристики ансамблевых систем. Эта оценка отрицательно ориентирована (т. е. чем меньше, тем лучше) и равна нулю для идеального прогноза. CRPS измеряется в тех же единицах, что и оцениваемая переменная, и не ограничена сверху. На рис. 3 представлены кривые CRPS для приземной температуры и скорости ветра. Видно, что влияние возмущений модели на CRPS мало для температуры, но заметно для скорости ветра. Несмотря на увеличение разброса ветра в экспериментах ASGLOB и MIX, оценка CRPS для них оказывается хуже за счет ухудшения точности прогноза (как и на рис. 2). Возмущения ASLAM, слабо влияющие на разброс и практически не меняющие ошибку прогноза скорости ветра, приводят к небольшому улучшению CRPS. Интересно, что для температуры временной ход CRPS и RMSE проявляет общие закономерности и демонстрирует выраженный суточный цикл, тогда как для ветра ход CRPS более похож на ход средней ошибки.

Дополнительное рассмотрение категоричных оценок для непрерывных величин подтверждает необходимость использования совокупности различных метрик для оценки качества ансамблевых прогнозов. Так, например, хотя ASGLOB и MIX показывают для порывов и скорости ветра худшие оценки CRPS (рис. 3), но дискриминирующая способность прогнозов в этих экспериментах оказывается лучшей, что проявляется в более высоких значениях ROCA (рис. 4). Прогноз вероятностей для ветра в этих экспериментах также остается лучшим (меньше оценка Брайера BS и ее компонента надежность).

Для температуры, как и в случае CRPS, слабое преимущество как в дискриминирующей способности, так и в прогнозируемых вероятностях остается за NOPERT и ASLAM (не представлено).

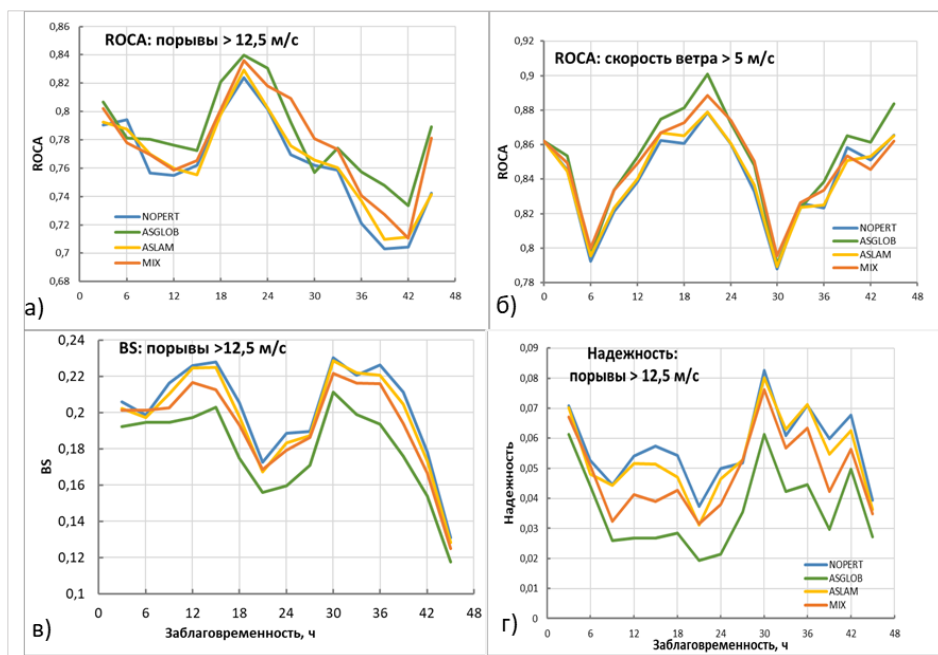
Заметим, что категоричные оценки рассчитываются для явлений, попадающих в заданные категории. Обычно выбирают некоторые пороговые значения и анализируются события (явления), когда рассматриваемая величина оказывается выше или ниже порога. При верификации ансамблевых прогнозов мы использовали различные пороги и явления, но в настоящей статье приводим лишь немногие наиболее интересные результаты. Так, например, для порывов ветра мы приводим результаты для превышения порога 12,5 м/с, который является одним из официальных порогов для оценки неблагоприятных погодных явлений, а для температуры рассматриваем переход значений через ноль, так как анализируемый зимний месяц характеризовался частыми оттепелями.

Влияние возмущений модели на прогноз осадков мало. При этом качество вероятностных прогнозов осадков достаточно высоко: для явлений “осадки более 1 мм/12 ч” значения ROCA достигают 0,95, а оценка Брайера оказывается менее 0,1. Анализ категоричных оценок (ROCA, оценки Брайера и ее компонент) показывает, что лучше прогнозируются осадки более 1 мм/12ч, чем факт выпадения осадков (подробнее см. [5]).



**Рис. 3.** CRPS для прогнозов температуры на уровне 2 м (слева) и скорости ветра на уровне 10 м (справа) при различных возмущениях модели.

**Fig. 3.** CRPS for 2-m temperature (on the left) and 10-m wind speed (on the right) forecasts with different model perturbations.



**Рис. 4.** ROCA (а), оценка Брайера (в) и ее компонента надежность (г) для прогнозов порывов приземного ветра более 12,5 м/с и, для сравнения, ROCA для скорости ветра на уровне 10 м более 5 м/с (б) при различных возмущениях модели.

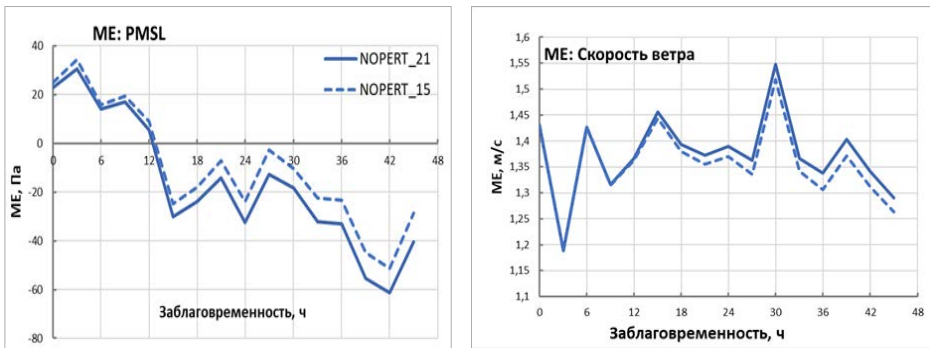
**Fig. 4.** (a), Brier score (в) and its reliability component (г) for surface wind gusts stronger than 12,5 m/s compared to ROCA for 10-m wind speed above 5 m/s (б) for different model perturbations.

### 3.3.3. Роль размера ансамбля

Ансамблевый прогноз – это задача, требующая большого количества компьютерных ресурсов. Несмотря на то, что гибридное распараллеливание кода модели ICON позволяет сократить астрономическое время расчетов за счет оптимального использования большого числа процессорных ядер, а область интегрирования невелика, применение высокого разрешения и множественное интегрирование модели в ансамбле приводят к существенным затратам машинного времени. На суперкомпьютере CRAY XC40-LC с пиковой производительностью около 1300 терафлопс для расчета по территории ЦФО одной реализации ансамбля ICON-Ru2-EPS на 128 ядрах требуется около часа времени.

Выбор размера ансамбля всегда является компромиссом между желанием получить возможно более подробный и качественный вероятностный прогноз и доступными вычислительными ресурсами. В данной работе были выполнены эксперименты по прогнозу с использованием ансамблей из 15 и 21 реализации и проанализированы их результаты с целью определения размера ансамбля, оптимального для использования в прогностической практике.

Анализ результатов экспериментов показал, что варьирование размера ансамбля с 21 до 15 практически не приводит к изменению среднеквадратических ошибок и разброса непрерывных метеорологических величин. Однако в средней ошибке давления на уровне моря и скорости приземного ветра с ростом заблаговременности прогноза начинает проявляться слабое влияние размера ансамбля. Это видно из рис. 5, на котором представлены результаты для эксперимента NOPERT.



**Рис. 5.** Зависимость качества среднего прогноза давления на уровне моря (слева) и скорости приземного ветра (справа) от размера ансамбля. Сплошной линией показаны средние ошибки для ансамбля из 21 реализации, пунктирной – для ансамбля из 15 реализаций.

**Fig. 5.** The skill of ensemble mean forecast of mean sea level pressure (left) and surface wind speed (right) as a function of ensemble size. The mean errors for 21 and 15 members are shown in solid and dashed lines respectively.

Результаты для остальных экспериментов аналогичны. Интересно, что наименьшее смещение демонстрирует меньший по размеру ансамбль. Не исключено, что это связано с ограниченностью рассмотренной выборки. Усиление влияния размера ансамбля в ходе прогноза коррелирует с современными тенденциями к более частому выпуску региональных ансамблевых прогнозов меньшего размера на меньшие заблаговременности [49].

Влияние размера ансамбля на категориальные оценки качества прогноза (ROCA, BS, BSS) оказалось незначимым. Исходя из вышеизложенного, было решено на настоящий момент в прогностической практике ограничиться размером ансамбля в 15 реализаций и в дальнейшем рассмотреть возможность перехода к коротким, но частым прогнозам.

#### **4. Анализ воспроизведения отдельного случая резкого изменения погоды**

В конце февраля 2022 года наблюдалось прохождение теплого атмосферного фронта через территорию ЦФО (рис. 6). С ним были связаны такие погодные явления, как усиления ветра, гололед, ледяные дожди, которые наблюдались преимущественно в Воронежской и Липецкой областях. Зафиксированы порывы ветра до 16–17 м/с. Качество воспроизведения этого случая системой ICON-Ru2-EPS было проанализировано путем сопоставления прогнозируемых и наблюдаемых метеорологических приземных характеристик, а также анализа прогнозируемых вероятностей отдельных событий.

На рис. 7 показаны средние по ансамблю поля прогнозов 12-часовых сумм осадков (фон) и соответствующие станционные наблюдения (цветные точки) для сроков с интенсивными (рис. 7а) и менее интенсивными (рис. 7б) осадками (для построения карт использована функция `plot-point-obs` пакета METplus). В целом, карты демонстрируют неплохое соответствие прогнозируемых и наблюдаемых областей осадков.

Для случая интенсивных осадков (рис. 7а), заметно небольшое смещение области их прогнозируемого выпадения на северо-запад и связанное с этим завышение количества осадков по отношению к наблюдениям на юго-востоке ЦФО. Правильно спрогнозировано отсутствие осадков на большей части ЦФО, где почти нет ложных тревог по явлению. Следует отметить, что для синоптиков особенно ценен факт прогноза интенсивных осадков, а небольшой пространственный сдвиг прогнозируемой области их выпадения не так критичен.

В случае осадков меньшей интенсивности (рис. 7б) прогноз оказался менее успешным. Хотя в целом правильно спрогнозирована область основных осадков на юге ЦФО, но их максимальные значения занижены. Имеется область ложных тревог на северо-западе ЦФО, где модель дает более протяженную область сильных осадков, тогда как наблюдаемые там суммы осадков не превышали 1,5 мм/12ч.

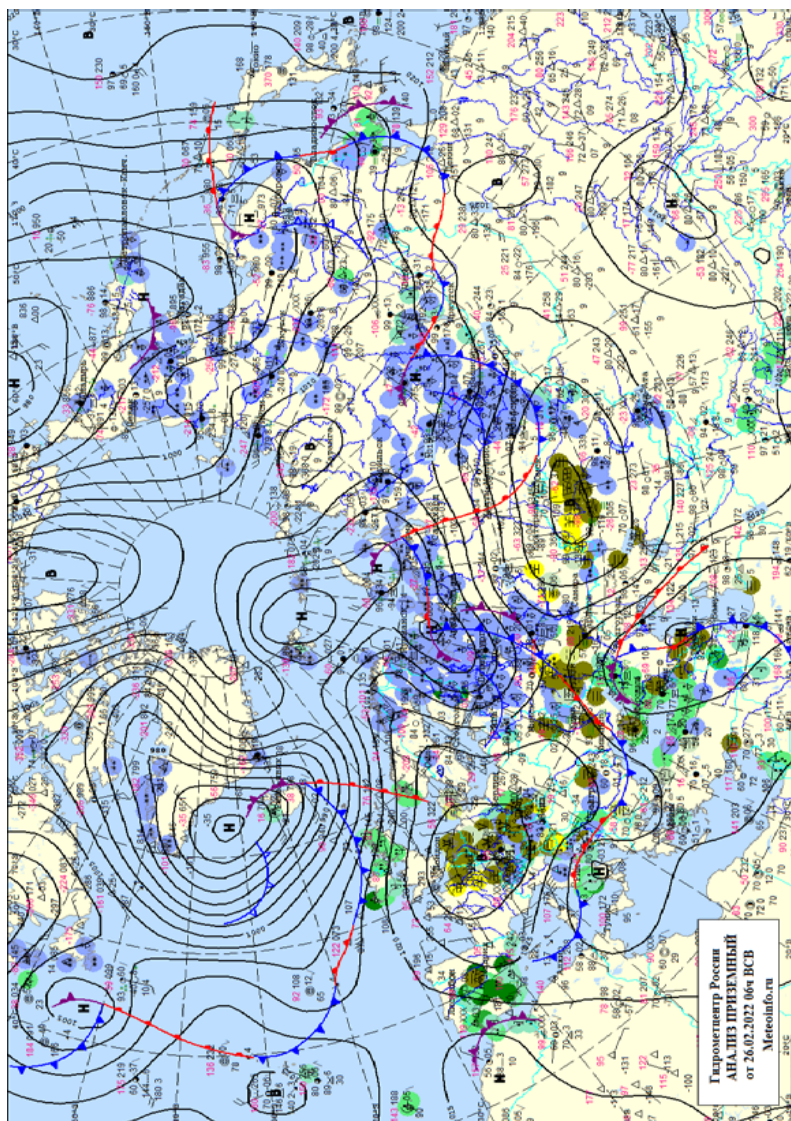
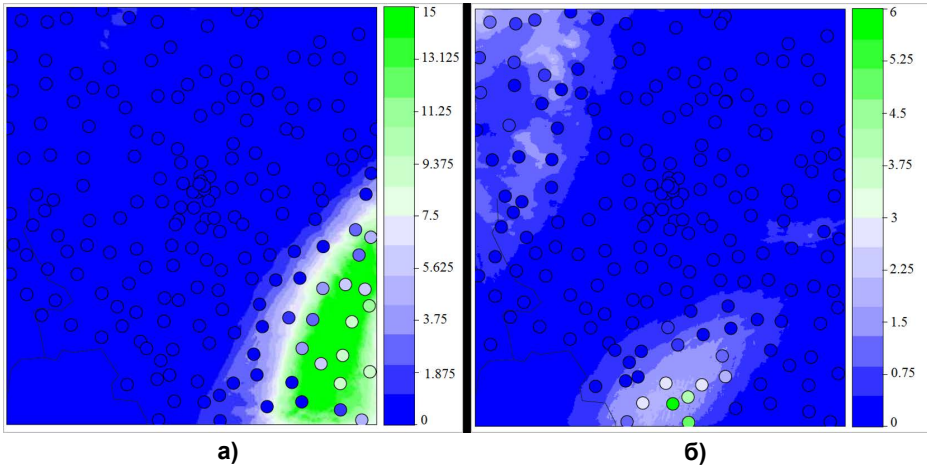


Рис. 6. Карта приземного анализа для 06 ч ВСВ 26 февраля 2022 г.

Fig. 6. The surface analysis chart at 06 UTC February 26, 2022.



**Рис. 7.** Среднее по ансамблю значение 12-часовых сумм осадков (фон) в сравнении с данными станционных наблюдений (цветные точки) для случаев с осадками разной интенсивности: интенсивные осадки 27.02.2022, 15 ч ВСВ (прогноз на 39 ч от 26.02.2022, 00 ч ВСВ) (а); менее интенсивные осадки 25.02.2022, 15 ч ВСВ (прогноз на 39 часов от 24.02.2022, 00 ч ВСВ) (б). Одинаковые шкалы для прогноза и наблюдений, мм/12 ч. Эксперимент NOPERT.  
**Fig. 7.** Ensemble mean 12-h precipitation (background) compared to station observations (color dots) for cases with different precipitation intensities: heavy precipitation for 15 UTC 27.02.2022 (39-hour forecast starting at 00 UTC 26.02.2022) (a); less intense precipitation for 15 UTC 25.02.2022 (39-hour forecast starting at 00 UTC 24.02.2022) (б). The color scales for forecast and observations are identical, mm/12h. Experiment NOPERT.

Для сравнительной оценки качества прогнозирования осадков различной интенсивности были дополнительно рассмотрены площади под кривой ROC (метрика ROCA; чем больше, тем лучше) для периода с 22 по 28 февраля 2022 г. и отдельно для 27 февраля 2022 г. Именно 27 февраля осадки были особо интенсивны, а в Воронежской и Липецкой областях наблюдался мокрый снег 5–8 мм/12ч, с налипанием и гололедными явлениями. Для этого дня ROCA оказалась существенно выше, чем для всего периода с 22 по 28 февраля 2022 г. (таблица), что подтверждает более высокую эффективность ансамблевой системы высокого разрешения при прогнозировании интенсивных осадков.

Полезность вероятностной продукции регионального ансамбля показал анализ качества воспроизведения таких приземных характеристик, как порывы ветра и температура. На рис. 8 (слева) видно хорошее соответствие прогнозируемых высоких вероятностей порывов ветра более 10 м/с и наблюдаемых значений этого же порядка. Хотя в некоторых точках с сильными порывами в центре ЦФО ансамбль давал их низкие вероятности, но эти точки лежали на границе правильно спрогнозированной области порывов, что позволяло синоптику учесть наличие данного опасного явления в прогнозе.

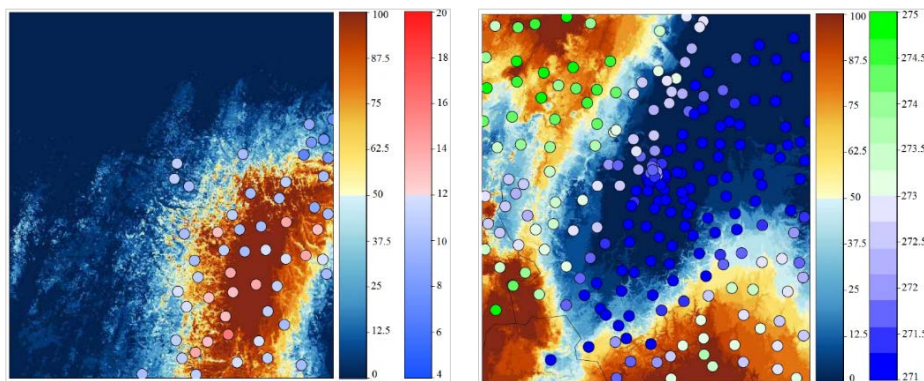
**Таблица.** Значения ROCA для прогноза наличия осадков (12-часовых сумм) в различные периоды. Эксперимент ASLAM

**Table.** ROCA for forecasts of precipitation occurrence (12h accumulation) in various periods. The experiment ASLAM

Заблаговременность прогноза, час	Временной период	
	27 февраля 2022 г.	22–28 февраля 2022 г.
15	0,939	0,906
27	0,986	0,872
39	0,970	0,916

Справа на рис. 8 показаны ансамблевые вероятности температуры на уровне 2 м более 272 К и наблюдения. Область тепла в целом спрогнозирована верно, четко просматривается язык минусовых температур, который, как и область осадков, слегка сдвинут в пространстве по линии с северо-запада на юго-восток.

В целом, анализ воспроизведения случая резкого изменения погоды ансамблевой системой ICON-Ru2-EPS показал полезность как средних по ансамблю прогнозов, так и вероятностной продукции.



**Рис. 8.** Ансамблевые вероятности (фон) и данные станционных наблюдений (цветные точки): вероятность порывов ветра на уровне 10 м более 10 м/с для 27.02.2022, 12 ч ВСВ (36-часовой прогноз от 26.02.2022, 00 ч ВСВ) (%) и наблюдения (м/с) (слева); вероятность температуры воздуха на уровне 2 м более 272 К для 26.02.2022, 00 ч ВСВ (48-часовой прогноз от 24.02.2022, 00 ч ВСВ) (%) и наблюдения (К) (справа). Левые шкалы – вероятности, правые – наблюдения.

**Fig. 8.** Ensemble probabilities (background) vs station observations (colored dots). Left: Probability of 10m wind gusts greater than 10 m/s for 27.02.2022, 12 UTC (36-hour forecast from 26.02.2022, 00 UTC) (%) and observations (m/s). Right: Probability of 2-m temperature greater than 272 K for 26.02.2022, 00 UTC (48-hour forecast from 24.02.2022, 00 UTC) (%) and observations (K). Left scales are probabilities, right scales are observations.

## Выводы

В настоящее время актуальной является задача вероятностного прогнозирования с высоким пространственно-временным разрешением. Для решения ее в Гидрометцентре России разработана иерархическая ансамблевая система краткосрочного прогноза, основанная на негидростатической модели ICON. Система представляет из себя глобальную ансамблевую систему с шагом сетки модели 40 км по глобусу и 20 км по Европейской территории России в сочетании с региональной системой ICON-Ru2-EPS по территории Центрального федерального округа с шагом сетки около 2,2 км и явным разрешением глубокой конвекции. Система более грубого разрешения является источником данных для системы высокого разрешения.

Выполнена подробная верификация прогнозов по региональной ансамблевой системе ICON-Ru2-EPS с помощью пакета METplus, предоставляющего удобную возможность расчета разнообразных метрик, совокупность которых необходима для оценки качества прогнозов. Анализ метрик, характеризующих точность, надежность, разрешение, смещение и дискриминирующую способность прогнозов приземных характеристик продемонстрировал высокое качество прогнозов по системе ICON-Ru2-EPS.

Сопоставление результатов прогнозов по ансамблевой системе ICON-Ru2-EPS с данными наблюдений для случая резкого изменения погоды показало, что система способна дать информацию об ожидаемом количестве и местоположении осадков (лучше – для интенсивных осадков). Продемонстрирована полезность вероятностной продукции ансамблевого прогноза для порывов ветра и приземной температуры.

Исследование применимости метода случайных возмущений параметров схем, описывающих процессы подсеточного масштаба, показало его низкую эффективность для системы с высоким разрешением ICON-Ru2-EPS для территории ЦФО в зимний период. Вариации наборов возмущаемых параметров и диапазонов возмущения позволили достичь существенного повышения разброса и улучшения вероятностных оценок для скорости и порывов ветра только в сочетании с увеличением систематической ошибки этих характеристик. Обнаружена сильная чувствительность разброса и средних по ансамблю значений скорости и порывов приземного ветра к возмущениям параметра, влияющего на торможение горизонтального потока за счет подсеточной орографии. Влияние возмущений параметров модели на вероятностный прогноз приземной температуры и осадков оказалось мало. На основе анализа результатов численных экспериментов было решено пока остановиться на использовании случайных возмущений параметров физических схем модели в варианте ASLAM, приводящих к небольшому увеличению разброса и улучшению вероятностного прогноза, но не вызывающему ухудшения качества среднего по ансамблю прогноза, и в дальнейшем рассмотреть возможность применения другого метода возмущения модели.

Сокращение размера ансамбля с 21 до 15 реализаций не привело к значимым изменениям в оценках качества прогнозов для всех рассмотренных метеорологических величин, за исключением незначительного уменьшения смещения для давления на уровне море и скорости приземного ветра, проявляющегося при росте заблаговременности прогноза. Исходя из этого, в дальнейшем предполагается ограничиться в ансамбле 15 реализациями.

Разработанная система является базовой для дальнейших работ по краткосрочному ансамблевому прогнозированию. В связи с ограничением потоков информации из Немецкой службы погоды, разработкой и окончанием оперативных испытаний системы краткосрочных глобальных прогнозов ICON-Ru13/6N29 и версии глобальной ансамблевой системы на основе модели ПЛАВ с разрешением около 20 км, предполагается в ближайшем будущем перейти на использование продукции новых технологий Гидрометцентра России для подготовки граничных/начальных условий для мезомасштабной ансамблевой системы. Кроме того, планируется добавить стохастические возмущения поверхностных характеристик и ввести возмущения параметров, обладающие реалистичными пространственно-временными корреляциями.

Исследование проведено в рамках научно-исследовательских работ Росгидромета АААА-А20-120021890120-8 и АААА-А20-120021490079-3 (темы 1.1.4 и 1.1.3 на 2020–2024 гг.) и темы с регистрационным номером 125032004255-7 Проекта 1.1 на 2025–2029 годы.

### Список литературы

1. Алферов Ю.В. Автоматизированная графическая система для визуализации результатов численных прогнозов // Труды Гидрометцентра России. 2003. Вып. 338. С. 119-124.
2. Астахова Е.Д., Бундель А.Ю., Багров А.Н., Розинкина И.А., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В., Цветков В.И. Система ансамблевого глобального прогноза метеорологических полей с заблаговременностью до 240 часов: результаты оперативных испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2016. Информационный сборник № 43. С. 63-79.
3. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Алгоритм расчета высоты свежеевыпавшего снега, предназначенный для постпроцессинга систем атмосферного моделирования (на примере COSMO) // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 350. С. 195-212.
4. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.
5. Кирсанов А.А., Тарасова М.А., Бундель А.Ю., Астахова Е.Д., Шувалова Ю.О., Розинкина И.А., Блинов Д.В. Многофакторная верификация результатов численных прогнозов погоды оперативной системы COSMO-Ru и отдельных компонентов развиваемой COSMO-Ru/icon // Метеорология и гидрология. 2024. № 8. С. 126-141.
6. Astakhova E., Alferov D., Alferov Yu., Bundel A. Ensemble approach to weather forecasting // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1740, no. 1. P. 012070. DOI: 10.1088/1742-6596/1740/1/012070.
7. Avgoustoglou E., Shtivelman A., Khain P., Marsigli C., Levi Y., Cerenzia I. On the seasonal sensitivity of ICON model // COSMO Newsletter. 2023. No. 22. DOI:10.5676/dwd\_pub/nwv/cosmo-nl\_22\_04.
8. Bishop C.H., Etherton B.J., Majumdar S.J. Adaptive Sampling with the Ensemble Transform Kalman Filter. Part I: Theoretical Aspects // Mon. Wea. Rev. 2001. Vol. 129. P. 420-436. DOI: 10.1175/1520-0493(2001)129<0420:ASWTET>2.0.CO;2.

9. Bloom S.C., Takacs L.L., da Silva A.M., Ledvina D. Data Assimilation Using Incremental Analysis Updates // Mon. Wea. Rev. 1996. Vol. 124. P. 1256-1271. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<1256:DAUIAU>2.0.CO;2.

10. Boultier F., Raynaud L., Nuissier O., Ménétrier B. Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2016. Vol. 142. P. 390-403. DOI: 10.1002/qj.2622.

11. Bowler N.E., Arribas A., Mylne K.R., Robertson K.B., Beare S.E. The MOGREPS short-range ensemble prediction system // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2008. Vol. 134. P. 703-722. DOI: 10.1002/qj.234.

12. Brown B. et al. The Model Evaluation Tools (MET) More than a Decade of Community-Supported Forecast Verification // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2021. Vol. 102. P. E782-E807. DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0093.1.

13. Buizza R., Palmer T.N. The singular-vector structure of the atmospheric general circulation // J. Atm. Sciences. 1995. Vol. 52. P. 1434-1456. DOI: 10.1175/1520-0469(1995)052<1434:TSVSOT>2.0.CO;2.

14. Buizza R., Miller M., Palmer T.N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System // Q.J.R. Meteorol. Soc. 1999. Vol. 125. P. 2887-2908. DOI: 10.1002/qj.49712556006.

15. Buizza R., Houtekamer P.L., Pellerin G., Toth Z., Zhu Y., Wei M.A. Comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP Global Ensemble Prediction Systems // Mon. Wea. Rev. 2005. Vol. 133. P. 1076-1097. DOI: 10.1175/MWR2905.1.

16. Buizza R., Leutbecher M., Isaksen L. Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF Ensemble Prediction System // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2008. Vol. 134. P. 2051-2066. DOI: 10.1002/qj.346.

17. Buizza R., Leutbecher M., Isaksen L., Haseler J. Combined use of EDA- and SV-based perturbations in the EPS // ECMWF Newsletter. 2010. Vol. 123. P. 22-28. DOI: <https://doi.org/10.21957/codf7bpp>.

18. Buizza R., Richardson D. 25 years of ensemble forecasting at ECMWF // ECMWF Newsletter. 2017. Vol. 153. P. 20-31. <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2017/18198-25-years-ensemble-forecasting-ecmwf.pdf>.

19. Christensen H.M., Lock S.-J., Moroz I.M., Palmer T.N. Introducing independent patterns into the Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2017. Vol. 143. P. 2168-2181. DOI: 10.1002/qj.3075

20. Duan Q. et al. Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019. 1200 p. DOI: 10.1007/978-3-642-39925-1.

21. Fieldextra (COSMO software), 2024. <https://www.cosmo-model.org/content/support/software/default.htm#fieldextra>

22. Frogner I.-L., Haakenstad H., Iversen T. Limited-area ensemble predictions at the Norwegian Meteorological Institute // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2006. Vol. 132. P. 2785-2808. DOI: 10.1256/qj.04.178.

23. Giorgetta M.A. et al. ICON-A, the atmosphere component of the ICON Earth system model: I. Model description // J. Adv. Model. Earth Syst. 2018. Vol. 10. DOI: 10.1029/2017MS001242.

24. Gofa F. Verification in COSMO consortium // COSMO Newsletter No. 23, 2024. P. 12. <https://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/newsLetters/newsLetter23/newsLetterNo23.pdf>

25. Hagelin S., Son J., Swinbank R., McCabe A., Roberts N., Tennant W. The Met Office convective-scale ensemble, MOGREPS-UK // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2017. Vol. 143. P. 2846-2861. DOI: 10.1002/qj.3135.

26. Hersbach H. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems // Wea. Forecasting. 2000. Vol. 15(5). P. 559-570. DOI: 10.1175/1520-0434(2000)015<0559:DOTCRP>2.0.CO;2.

27. Hohenegger C. et al. ICON-Sapphire: simulating the components of the Earth system and their interactions at kilometer and subkilometer scales // Geosci. Model Dev. 2023. Vol. 16. P. 779-811. DOI: 10.5194/gmd-16-779-2023.

28. Houtekamer P.L., Lefayvre L., Derome J., Ritchie H., Mitchell H.L. A system simulation approach to ensemble prediction // *Mon. Wea. Rev.* 1996. Vol. 124. P. 1225-1242. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<1225:ASSATE>2.0.CO;2.
29. Houtekamer P.L., Mitchell H.L., Deng X. Model error representation in an operational ensemble Kalman filter // *Mon. Wea. Rev.* 2009. Vol. 137. P. 2126-2143. DOI: 10.1175/2008MWR2737.1.
30. Houtekamer P.L., Deng X., Mitchell H.L., Baek S.-J., Gagnon N. Higher resolution in an operational ensemble Kalman filter // *Mon. Wea. Rev.* 2014. Vol. 142. P. 1143-1162. DOI: 10.1175/MWR-D-13-00138.1.
31. Judt F. Insights into Atmospheric Predictability through Global Convection-Permitting Model Simulations // *J. Atmos. Sci.* 2018. Vol. 75. P. 1477-1497. DOI: 10.1175/JAS-D-17-0343.1.
32. Jungclaus J.H., Lorenz S.J., Schmidt H. et al. The ICON Earth System Model version 1.0 // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2022. Vol. 14. P. e2021MS002813. DOI: 10.1029/2021MS002813.
33. Klasa C., Arpagaus M., Walser A., Wernli H. An evaluation of the convection-permitting ensemble COSMO-E for three contrasting precipitation events in Switzerland // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2018. Vol. 144. P. 744-764. DOI: 10.1002/qj.3245.
34. Keresturi E., Wang Y., Meier F., Weidle F., Wittmann C., Atencia A. Improving initial condition perturbations in a convection-permitting ensemble prediction system // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2019. Vol. 145. P. 993-1012. DOI: 10.1002/qj.3473.
35. Kuhnlein C., Keil C., Craig G.C., Gebhardt C. The impact of downscaled initial condition perturbations on convective-scale ensemble forecasts of precipitation // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2014. Vol. 140. P. 1552-1562. DOI: 10.1002/qj.2238.
36. Lang S.T.K., Lock S.-J., Leutbecher M., Bechtold P., Forbes R.M. Revision of the Stochastically Perturbed Parametrisations model uncertainty scheme in the Integrated Forecasting System // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2021. Vol. 147. P. 1364-1381. DOI: 10.1002/qj.3978.
37. Lang S., Schepers D., Rodwell M. IFS upgrade brings many improvements and unifies medium-range resolutions // *ECMWF Newsletter*. 2023. No. 176. <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/012023/81379-newsletter-no-176-summer-2023.pdf>.
38. Leutbecher M., Lock S.J., Ollinaho P. et al. Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: state of the art and future vision // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 143. P. 2315-2339. DOI: 10.1002/qj.3094.
39. Lock S.J., Lang S.T.K., Leutbecher M., Hogan R.J., Vitart V. Treatment of model uncertainty from radiation by the Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme and associated revisions in the ECMWF ensembles // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2019. Vol. 145 (Supplement 1). P. 75-89. DOI: 10.1002/qj.3570.
40. Magnusson L., Ackerley D., Bouteloup Y. et al. Skill of medium-range forecast models using the same initial conditions // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2022. DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0234.1.
41. Marsigli C., Boccanera F., Montani A., Paccagnella T. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification // *Nonlin. Proc. Geophys.* 2005. Vol. 12 (4). P. 527-536. DOI: 10.5194/npg-12-527-2005. (hal-00302614).
42. Marsigli C. On the initial conditions of the ICON-D2-EPS ensemble: An analysis in terms of spread and skill // *EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-10803*. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-10803.
43. Mzyak V., Rogutov V., Alipova K. Development of the new ensemble weather prediction system at the Hydrometcentre of Russia // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1740. P. 012072. DOI: 10.1088/1742-6596/1740/1/012072.
44. Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., Petroliagis T. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 1996. Vol. 122. P. 73-119. DOI: 10.1256/smsqj.52904.
45. Molteni F., Buizza R., Marsigli C. et al. A strategy for high-resolution ensemble prediction. I: Definition of representative members and global-model experiments // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2001. Vol. 127. P. 2069-2094. DOI: 10.1002/qj.49712757612.

46. *Montani A., Cesari D., Marsigli C., Paccagnella T.* Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges // *Tellus A.* 2011. Vol. 63. P. 605-624. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00499.x.

47. *Ollinaho P., Lock S.-J., Leutbecher M. et al.* Towards process-level representation of model uncertainties: stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 143. P. 408-422. DOI: 10.1002/qj.2931.

48. *Peralta C., Ben Bouallègue Z., Theis S. E., Gebhardt C., Buchhold M.* Accounting for initial condition uncertainties in COSMO-DE-EPS // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. P. D07108. DOI: 10.1029/2011JD016581.

49. *Porson A.N., Carr J.M., Hagelin S. et al.* Recent upgrades to the Met Office convective-scale ensemble: An hourly time-lagged 5-day ensemble // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146. P. 3245-3265. DOI: 10.1002/qj.3844.

50. *Rieger D., Milelli M., Boucouvala D. et al.* Verification of ICON in Limited Area Mode at COSMO National Meteorological Services // *Reports on ICON.* 2021. Vol. 6. DOI: 10.5676/DWD\_pub/nwv/icon\_006.

51. *Reinert D., Prill F., Frank H. et al.* DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System // *Deutscher Wetterdienst (DWD).* 2024. [https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modelldokumentationen/nwv/icon/icon\\_dbbeschr\\_aktuell.html](https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modelldokumentationen/nwv/icon/icon_dbbeschr_aktuell.html).

52. *Rodwell M. J., Richardson D. S., Parsons D. B., Wernli H.* Flow-Dependent Reliability: A Path to More Skillful Ensemble Forecasts // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2018. Vol. 99. P. 1015-1026. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0027.1.

53. *Schraff C., Reich H., Rhodin A. et al.* Kilometre-scale ensemble data assimilation for the COSMO model (KENDA) // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2016. Vol. 142. P. 1453-1472. DOI: 10.1002/qj.2748.

54. *Schlemmer L., Zängl G., Helmert J. et al.* ICON model parameters suitable for model tuning. DWD, 2022. <https://www.cosmo-model.org/content/support/icon/tuning/icon-tuning.pdf>.

55. *Shutts G.J.* A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2005. Vol. 131. P. 3079-3100. DOI: 10.1256/qj.04.106.

56. *Stensrud D. J., Brooks H. E., Du J., Tracton M. S., Rogers E.* Using Ensembles for Short-Range Forecasting // *Mon. Wea. Rev.* 1999. Vol. 127. P. 433-446. DOI: 10.1175/1520-0493(1999)127<0433:UEFSRF>2.0.CO;2.

57. *Tang Y., Lean H.W., Bornemann, J.* The benefits of the Met Office variable resolution NWP model for forecasting convection // *Met. Apps.* 2013. Vol. 20. P. 417-426. DOI: 10.1002/met.1300.

58. *Tennant W., Beare S.* New schemes to perturb sea-surface temperature and soil moisture content in MOGREPS // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2014. Vol. 140. P. 1150-1160. DOI: 10.1002/qj.2202.

59. *Toth Z., Kalnay E.* Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1993. Vol. 74. P. 2317-2330. DOI: 10.1175/1520-0477(1993)074<2317:EFANTG>2.0.CO;2.

60. *Toth Z., Kalnay E.* Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method // *Mon. Wea. Rev.* 1997. Vol. 125. P. 3297-3319. DOI: 10.1175/1520-0493(1997)125<3297:EFANAT>2.0.CO;2.

61. *Tsyrlunikov M., Astakhova E., Gayfulin D.* Additive Model Perturbations Scaled by Physical Tendencies for Use in Ensemble Prediction // *Tellus A.* 2023. Vol. 75 (1). P. 334-357. DOI: 10.16993/tellusa.3224.

62. *Zängl G., Reinert D., Rípodas P., Baldauf M.* The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 141. P. 563-579. DOI: 10.1002/qj.2378.

63. *Zängl G., Reinert D., Prill F.* Grid refinement in ICON v2.6.4 // *Geosci. Model Dev.* 2022. Vol. 15. P. 7153-7176. DOI: 10.5194/gmd-15-7153-2022.

64. *Zhang F., Bei N., Rotunno R., Snyder C., Epifanio C. C.* Mesoscale Predictability of Moist Baroclinic Waves: Convection-Permitting Experiments and Multistage Error Growth Dynamics // *J. Atmos. Sci.* 2007. Vol. 64. P. 3579-3594. DOI: 10.1175/JAS4028.1.

65. Vié B., Nuissier O., Ducrocq V. Cloud-Resolving Ensemble Simulations of Mediterranean Heavy Precipitating Events: Uncertainty on Initial Conditions and Lateral Boundary Conditions // *Mon. Wea. Rev.* 2011. Vol. 139. P. 403-423. DOI: 10.1175/2010MWR3487.1.

66. Wang X., Qiu X., Wu B. *et al.* Analysis of the different influence between initial/boundary and physical perturbation during ensemble forecast of fog // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2023. Vol. 135. P. 44. DOI: 10.1007/s00703-023-00981-2.

67. Wang Y., Bellus M., Wittmann C. *et al.* The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 137. P. 483-502. DOI: 10.1002/qj.751.

68. Wang Y., Bellus M., Geleyn J. *et al.* A New Method for Generating Initial Condition Perturbations in a Regional Ensemble Prediction System: Blending // *Mon. Wea. Rev.* 2014. Vol. 142. P. 2043-2059. DOI: 10.1175/MWR-D-12-00354.1.

69. Wang Y., Belluš M., Weidle F. *et al.* Impact of land surface stochastic physics in ALADIN-LAEF // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2019. Vol. 145. P. 3333-3350. DOI: 10.1002/qj.3623.

70. Wei M., Toth Z., Wobus R., Zhu Y., Bishop C., Wang X. Ensemble transform Kalman filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP // *Tellus A.* 2006. Vol. 58. P. 28-44. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2006.00159.x.

71. Wei M., Toth Z., Wobus R., Zhu Y. Initial perturbations based on the ensemble transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system // *Tellus A.* 2008. Vol. 60. P. 62-79. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00273.x.

72. Wilks D. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 4th Edition // Elsevier. 2019. DOI: 10.1016/C2017-0-03921-6.

## References

1. Alferov Yu.V. Automated graphical system to visualize numerical forecast results. *Trudy Gidrometcentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2003, vol. 338, pp. 119-124 [in Russ.].

2. Astakhova E.D., Bundel A.Y., Bagrov A.N., Rozinkina I.A., Ponomareva T.Y., Ruzanova I.V., Tsvetkov V.I. Sistema ansamblevogo global'nogo prognoza meteorologicheskikh polej s zablagovremennost'ju do 240 chasov: rezul'taty operativnyh ispytaniy [Global ensemble system for predicting meteorological fields up to 240 hours ahead: results of operational trials]. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tehnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov, Informacionnyj sbornik № 43*. Ed. A.A. Alekseeva. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN publ., 2016, pp. 63-79 [in Russ.].

3. Kazakova E.V., Chumakov M.M., Rozinkina I.A. Algorithm for calculation of fresh snow height for postprocessing of atmospheric modeling systems (using COSMO as an example). *Trudy Gidrometcentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2013, vol. 350, pp. 195-212 [in Russ.].

4. Kiktev D.B., Muraviev A.V., Bundel A.Y. Metodicheskie rekomendacii po verifikacii meteorologicheskikh prognozov [Methodical guidelines for weather forecasts verification]. Moscow, AMA PRESS publ., 2021, 94 p. [in Russ.].

5. Kirsanov A.A., Tarasova M.A., Bundel' A.Yu., Astakhova E.D., Shuvalova Yu.O., Rozinkina I.A., Blinov D.V. Multipurpose Verification of the COSMO-Ru Operational System and Experimental Technologies Based on the ICON Model. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2024, vol. 49, no. 8, pp. 750-761.

6. Astakhova E., Alferov D., Alferov Yu., Bundel A. Ensemble approach to weather forecasting. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1740, no. 1, pp. 012070. DOI: 10.1088/1742-6596/1740/1/012070.

7. Avgoustoglou E., Shtivelman A., Khain P., Marsigli C., Levi Y., Cerenzia I. On the seasonal sensitivity of ICON model. *COSMO Newsletter*, 2023, no. 22. DOI:10.5676/dwd\_pub/nwv/cosmo-nl\_22\_04.

8. Bishop C.H., Etherton B.J., Majumdar S.J. Adaptive Sampling with the Ensemble Transform Kalman Filter. Part I: Theoretical Aspects. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, vol. 129, pp. 420-436. DOI: 10.1175/1520-0493(2001)129<0420:ASWTET>2.0.CO;2.

9. Bloom S.C., Takacs L.L., da Silva A.M., Ledvina D. Data Assimilation Using Incremental Analysis Updates. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, vol. 124, pp. 1256-1271. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<1256:DAUIAU>2.0.CO;2.

10. Boultier F., Raynaud L., Nuissier O., Ménétrier B. Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2016, vol. 142, pp. 390-403. DOI: 10.1002/qj.2622.

11. Bowler N.E., Arribas A., Mylne K.R., Robertson K.B., Beare S.E. The MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2008, vol. 134, pp. 703-722. DOI: 10.1002/qj.234.

12. Brown B. et al. The Model Evaluation Tools (MET) More than a Decade of Community-Supported Forecast Verification. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2021, vol. 102, pp. E782-E807. DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0093.1.

13. Buizza R., Palmer T.N. The singular-vector structure of the atmospheric general circulation // *J. Atm. Sciences*, 1995, vol. 52, pp. 1434-1456. DOI: 10.1175/1520-0469(1995)052<1434:TSVSOT>2.0.CO;2.

14. Buizza R., Miller M., Palmer T.N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 1999, vol. 125, pp. 2887-2908. DOI: 10.1002/qj.49712556006.

15. Buizza R., Houtekamer P.L., Pellerin G., Toth Z., Zhu Y., Wei M.A. Comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP Global Ensemble Prediction Systems. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, vol. 133, pp. 1076-1097. DOI: 10.1175/MWR2905.1.

16. Buizza R., Leutbecher M., Isaksen L. Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2008, vol. 134, pp. 2051-2066. DOI: 10.1002/qj.346.

17. Buizza R., Leutbecher M., Isaksen L., Haseler J. Combined use of EDav- and SV-based perturbations in the EPS. *ECMWF Newsletter*, 2010, vol. 123, pp. 22-28. DOI: <https://doi.org/10.21957/codf7bpp>.

18. Buizza R., Richardson D. 25 years of ensemble forecasting at ECMWF // *ECMWF Newsletter*, 2017, vol. 153, pp. 20-31. Available at: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/library/2017/18198-25-years-ensemble-forecasting-ecmwf.pdf>.

19. Christensen H.M., Lock S.-J., Moroz I.M., Palmer T.N. Introducing independent patterns into the Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2017, vol. 143, pp. 2168-2181. DOI: 10.1002/qj.3075.

20. Duan Q. et al. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019, 1200 p. DOI: 10.1007/978-3-642-39925-1.

21. Fieldextra (COSMO software), 2024. Available at: <https://www.cosmo-model.org/content/support/software/default.htm#fieldextra>.

22. Frogner I.-L., Haakenstad H., Iversen T. Limited-area ensemble predictions at the Norwegian Meteorological Institute. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2006, vol. 132, pp. 2785-2808. DOI: 10.1256/qj.04.178.

23. Giorgetta M.A. et al. ICON-A, the atmosphere component of the ICON Earth system model: I. Model description. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2018, vol. 10. DOI: 10.1029/2017MS001242

24. Gofa F. Verification in COSMO consortium. *COSMO Newsletter*, 2024, no.23, pp. 12. Available at: <https://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/newsLetters/newsLetter23/newsLetterNo23.pdf>.

25. Hagelin S., Son J., Swinbank R., McCabe A., Roberts N., Tennant W. The Met Office convective-scale ensemble, MOGREPS-UK. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 143, pp. 2846-2861. DOI: 10.1002/qj.3135.

26. Hersbach H. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems. *Wea. Forecasting*, 2000, vol. 15, no. 5, pp. 559-570. DOI: 10.1175/1520-0434(2000)015<0559:DOTCRP>2.0.CO;2.

27. Hohenegger C. et al. ICON-Sapphire: simulating the components of the Earth system and their interactions at kilometer and subkilometer. *Geosci. Model Dev.*, 2023, Vol. 16, pp. 779-811. DOI: 10.5194/gmd-16-779-2023.

28. Houtekamer P.L., Lefaiyre L., Derome J., Ritchie H., Mitchell H.L. A system simulation approach to ensemble prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, vol. 124, pp. 1225-1242. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<1225:ASSATE>2.0.CO;2.
29. Houtekamer P.L., Mitchell H.L., Deng X. Model error representation in an operational ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2009, vol. 137, pp. 2126-2143. DOI: 10.1175/2008MWR2737.1.
30. Houtekamer P.L., Deng X., Mitchell H.L., Baek S.-J., Gagnon N. Higher resolution in an operational ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2014, vol. 142, pp. 1143-1162. DOI: 10.1175/MWR-D-13-00138.1.
31. Judt F. Insights into Atmospheric Predictability through Global Convection-Permitting Model Simulations. *J. Atmos. Sci.*, 2018, vol. 75, pp. 1477-1497. DOI: 10.1175/JAS-D-17-0343.1.
32. Jungclaus J.H., Lorenz S.J., Schmidt H. et al. The ICON Earth System Model version 1.0. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2022, vol. 14, p. e2021MS002813. DOI: 10.1029/2021MS002813.
33. Klasa C., Arpaugaus M., Walser A., Wernli H. An evaluation of the convection-permitting ensemble COSMO-E for three contrasting precipitation events in Switzerland. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2018, vol. 144, pp. 744-764. DOI: 10.1002/qj.3245.
34. Keresturi E., Wang Y., Meier F., Weidle F., Wittmann C., Atencia A. Improving initial condition perturbations in a convection-permitting ensemble prediction system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2019, vol. 145, pp. 993-1012. DOI: 10.1002/qj.3473.
35. Kuhnlein C., Keil C., Craig G.C., Gebhardt C. The impact of downscaled initial condition perturbations on convective-scale ensemble forecasts of precipitation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2014, vol. 140, pp. 1552-1562. DOI: 10.1002/qj.2238.
36. Lang S.T.K., Lock S.-J., Leutbecher M., Bechtold P., Forbes R.M. Revision of the Stochastically Perturbed Parametrisations model uncertainty scheme in the Integrated Forecasting System. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2021, vol. 147, pp. 1364-1381. DOI: 10.1002/qj.3978.
37. Lang S., Schepers D., Rodwell M. IFS upgrade brings many improvements and unifies medium-range resolutions. ECMWF Newsletter, 2023, no. 176. Available at: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/012023/81379-newsletter-no-176-summer-2023.pdf>.
38. Leutbecher M., Lock S.J., Ollinaho P. et al. Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: state of the art and future vision. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 143, pp. 2315-2339. DOI: 10.1002/qj.3094.
39. Lock S.J., Lang S.T.K., Leutbecher M., Hogan R.J., Vitart V. Treatment of model uncertainty from radiation by the Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme and associated revisions in the ECMWF ensembles. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2019, vol. 145, pp. 75-89. DOI: 10.1002/qj.3570.
40. Magnusson L., Ackerley D., Bouteloup Y. et al. Skill of medium-range forecast models using the same initial conditions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2022. DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0234.1.
41. Marsigli C., Boccanera F., Montani A., Paccagnella T. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification. *Nonlin. Proc. Geophys.*, 2005, vol. 12, no. 4, pp. 527-536. DOI: 10.5194/npg-12-527-2005. (hal-00302614).
42. Marsigli C. On the initial conditions of the ICON-D2-EPS ensemble: An analysis in terms of spread and skill. EGU General Assembly 2020, Online, 4-8 May 2020, EGU2020-10803. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-10803.
43. Mityak V., Rogutov V., Alipova K. Development of the new ensemble weather prediction system at the Hydrometcentre of Russia. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1740, pp. 012072. DOI: 10.1088/1742-6596/1740/1/012072.
44. Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., Petroliagis T. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 1996, vol. 122, pp. 73-119. DOI: 10.1256/smsqj.52904.
45. Molteni F., Buizza R., Marsigli C. et al. A strategy for high-resolution ensemble prediction. I: Definition of representative members and global-model experiments. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2001, vol. 127, pp. 2069-2094. DOI: 10.1002/qj.49712757612.

46. Montani A., Cesari D., Marsigli C., Paccagnella T. Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges. *Tellus A.*, 2011, vol. 63, pp. 605-624. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00499.x.

47. Ollinaho P., Lock S.-J., Leutbecher M. et al. Towards process-level representation of model uncertainties: stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 143, pp. 408-422. DOI: 10.1002/qj.2931.

48. Peralta C., Ben Bouallègue Z., Theis S. E., Gebhardt C., Buchhold M. Accounting for initial condition uncertainties in COSMO-DE-EPS. *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, pp. D07108. DOI: 10.1029/2011JD016581.

49. Porson A.N., Carr J.M., Hagelin S. et al. Recent upgrades to the Met Office convective-scale ensemble: An hourly time-lagged 5-day ensemble. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 3245-3265. DOI: 10.1002/qj.3844.

50. Rieger D., Milelli M., Boucouvala D. et al. Verification of ICON in Limited Area Mode at COSMO National Meteorological Services. *Reports on ICON*, 2021, vol. 6. DOI: 10.5676/DWD\_pub/nwv/icon\_006.

51. Reinert D., Prill F., Frank H. et al. DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System. Deutscher Wetterdienst (DWD), 2024. Available at: [https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modell/documentationen/nwv/icon/icon\\_dbbeschr\\_aktuell.html](https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modell/documentationen/nwv/icon/icon_dbbeschr_aktuell.html).

52. Rodwell M. J., Richardson D. S., Parsons D. B., Wernli H. Flow-Dependent Reliability: A Path to More Skillful Ensemble Forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2018, vol. 99, pp. 1015-1026. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0027.1.

53. Schraff C., Reich H., Rhodin A. et al. Kilometre-scale ensemble data assimilation for the COSMO model (KENDA). *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2016, vol. 142, pp. 1453-1472. DOI: 10.1002/qj.2748.

54. Schlemmer L., Zängl G., Helmert J. et al. ICON model parameters suitable for model tuning. DWD publ., 2022. Available at: <https://www.cosmo-model.org/content/support/icon/tuning/icon-tuning.pdf>.

55. Shutts G.J. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2005, vol. 131, pp. 3079-3100. DOI: 10.1256/qj.04.106

56. Stensrud D.J., Brooks H.E., Du J., Tracton M.S., Rogers E. Using Ensembles for Short-Range Forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, vol. 127, pp. 433-446. DOI: 10.1175/1520-0493(1999)127<0433:UEFSRF>2.0.CO;2.

57. Tang Y., Lean H.W., Bornemann, J. The benefits of the Met Office variable resolution NWP model for forecasting convection. *Met. Apps.*, 2013, vol. 20, pp. 417-426. DOI: 10.1002/met.1300.

58. Tennant W., Beare S. New schemes to perturb sea-surface temperature and soil moisture content in MOGREPS. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2014, vol. 140, pp. 1150-1160. DOI: 10.1002/qj.2202.

59. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, vol. 74, pp. 2317-2330. DOI: 10.1175/1520-0477(1993)074<2317:EFANTG>2.0.CO;2.

60. Toth Z., Kalnay E. Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, vol. 125, pp. 3297-3319. DOI: 10.1175/1520-0493(1997)125<3297:EFANAT>2.0.CO;2.

61. Tsyrlunikov M., Astakhova E., Gayfulin D. Additive Model Perturbations Scaled by Physical Tendencies for Use in Ensemble Prediction. *Tellus A.*, 2023, vol. 75, no. 1, pp. 334-357. DOI: 10.16993/tellusa.3224.

62. Zängl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2015, vol. 141, pp. 563-579. DOI: 10.1002/qj.2378.

63. Zängl G., Reinert D., Prill F. Grid refinement in ICON v2.6.4. *Geosci. Model Dev.*, 2022, vol. 15, pp. 7153-7176. DOI: 10.5194/gmd-15-7153-2022.

64. Zhang F., Bei N., Rotunno R., Snyder C., Epifanio C. C. Mesoscale Predictability of Moist Baroclinic Waves: Convection-Permitting Experiments and Multistage Error Growth Dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 2007, vol. 64, pp. 3579-3594. DOI: 10.1175/JAS4028.1.

65. Vié B., Nuisssier O., Ducrocq V. Cloud-Resolving Ensemble Simulations of Mediterranean Heavy Precipitating Events: Uncertainty on Initial Conditions and Lateral Boundary Conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 2011, vol. 139, pp. 403-423. DOI: 10.1175/2010MWR3487.1.

66. Wang X., Qiu X., Wu B. et al. Analysis of the different influence between initial/boundary and physical perturbation during ensemble forecast of fog. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2023, vol. 135, pp. 44. DOI: 10.1007/s00703-023-00981-2.

67. Wang Y., Bellus M., Wittmann C. et al. The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2011, vol. 137, pp. 483-502. DOI: 10.1002/qj.751.

68. Wang Y., Bellus M., Geleyn J. et al. A New Method for Generating Initial Condition Perturbations in a Regional Ensemble Prediction System: Blending. *Mon. Wea. Rev.*, 2014, vol. 142, pp. 2043-2059. DOI: 10.1175/MWR-D-12-00354.1.

69. Wang Y., Belluš M., Weidle F. et al. Impact of land surface stochastic physics in ALADIN-LAEF. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2019, vol. 145, pp. 3333-3350. DOI: 10.1002/qj.3623.

70. Wei M., Toth Z., Wobus R., Zhu Y., Bishop C., Wang X. Ensemble transform Kalman filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP. *Tellus A*, 2006, vol. 58, pp. 28-44. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2006.00159.x.

71. Wei M., Toth Z., Wobus R., Zhu Y. Initial perturbations based on the ensemble transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system. *Tellus A*, 2008, vol. 60, pp. 62-79. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00273.x.

72. Wilks D. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 4th Edition. Elsevier, 2019. DOI: 10.1016/C2017-0-03921-6.

*Поступила 28.01.2025; одобрена после рецензирования 27.03.2025;  
принята в печать 10.04.2025.*

*Submitted 28.01.2025; approved after reviewing 27.03.2025;  
accepted for publication 10.04.2025.*