

В.Г. Мизяк¹, К.А. Алипова¹, М.А. Толстых^{2,1}, В.С. Розутов¹

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АНСАМБЛЕВОГО СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПЛАВ

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва;

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва

1. Краткое описание модели ПЛАВ и локального ансамблевого фильтра Калмана

1.1. Локальный ансамблевый фильтр Калмана с переходом в пространство ансамбля

Алгоритм системы усвоения данных на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля (фильтр LETKF) предложен в [17]. Реализация систем усвоения на основе алгоритма LETKF описана в [26].

Алгоритм состоит в последовательном расчете по формулам (1) – (3):

$$\bar{x}^a = \bar{x}^b + X^b P^a (y - H\bar{x}^b)^T R^{-1} (y - H\bar{x}^b), \quad (1)$$

$$X^a = X^b [(N_f - 1)P^a]^{1/2}, \quad (2)$$

$$P^a = [(N_f - 1)I + (HX^b)^T R^{-1} (HX^b)]^{-1}, \quad (3)$$

где P^a – матрица ковариации анализа в пространстве ансамбля первых приближений;

y – вектор наблюдений размерности N_o ;

$\{x_1^b, \dots, x_{N_f}^b\}$ – ансамбль первого приближения из N_f векторов прогноза размерности N_a ,

полученных на предыдущем шаге цикла усвоения;

$X^b = \{x_1^b - \bar{x}^b, \dots, x_{N_f}^b - \bar{x}^b\}$ – матрица отклонений от среднего первых приближений,

где \bar{x}^b – среднее по ансамблю первое приближение;

$X^a = \{x_1^a - \bar{x}^a, \dots, x_{N_a}^a - \bar{x}^a\}$ – матрица отклонений от среднего анализ;

\bar{x}^a – средний анализ; R – матрица ковариации ошибок наблюдений;

H – оператор наблюдений, переводящий любой вектор состояния x , принадлежащий «модельному» пространству размерности N_a , в вектор наблюдений y , принадлежащий пространству наблюдений размерности N_o : $y = Hx + a$.

Фильтр LETKF работает на согласованной с моделью ПЛАВ сетке. В вектор состояния атмосферы фильтра LETKF входят температура, относительная влажность, зональная и меридиональная скорость ветра для каждого узла сетки в свободной атмосфере. Отличие от атмосферных переменных модели ПЛАВ – использование относительной влажности вместо удельной. Кроме того, в вектор состояния атмосферы фильтра LETKF входят давление на поверхности, температура и относительная влажность на высоте 2 метра.

Размер ансамбля легко масштабируется и ограничен в основном объемом доступных вычислительных ресурсов.

Система усвоения обрабатывает наблюдения на сети метеостанций, аэрологические, самолетные и спутниковые наблюдения скорости ветра AMV.

Решение (\bar{x}^a и X^a) в LETKF вычисляется локально. Вычисления производятся независимо для каждого узла сетки с использованием своего набора локальных наблюдений, находящихся в пределах заранее заданного радиуса влияния от выбранного узла. Такая локализация позволяет легко реализовать параллельные вычисления. Кроме того, локализация позволяет избежать влияния ложных корреляций между ошибками первых приближений в удаленных друг от друга узлах. Ложные корреляции могут возникать при использовании оценки матрицы ковариации по ансамблю ограниченного размера.

В данной реализации фильтра [26] вычисления производятся независимо для каждого узла сетки по широте, долготе и высоте, используя наблюдения, попадающие в локальную область – цилиндр заданного радиуса и высоты, построенный вокруг выбранного узла.

Для увеличения разброса ансамбля применяется мультипликативная и аддитивная инфляция.

Сначала мультипликативная инфляция увеличивает разброс ансамбля, затем к рассчитанным с ее учетом элементам ансамбля добавляется сгенерированный шум (аддитивная инфляция).

Мультипликативная инфляция реализована следующим образом: матрица ковариации ошибок первого приближения умножается на коэффициент ρ , больший единицы, и формула (3) приобретает вид:

$$P^a = [(N_f - 1)\rho^{-1}I + (HX^b)^T R^{-1}(HX^b)]^{-1}. \quad (4)$$

При использовании аддитивной инфляции к полученным участникам ансамбля X^a прибавляется случайный шум, параметризующий погрешность модели:

$$(x_i^a)_{inf} = x_i^a + \varepsilon, \quad (5)$$

где x_i^a – столбцы матрицы X^a , полученные в (2);

i – номер участника ансамбля;

ε – случайный шум;

$\left[(x_1^a)_{inf}, \dots, (x_{N_f}^a)_{inf} \right]$ – итоговый ансамбль анализов после применения инфляции.

Расчет аддитивной инфляции выполняется по формуле:

$$s(h, p) = \sum r_{nm}(h, p) Y_{nm}, \quad (6)$$

где Y_{nm} – сферические гармоники степени n и порядка m [19];

h, p – номер модельного уровня и номер модельной переменной.

Коэффициенты r_{nm} – сгенерированные псевдослучайные числа с гауссовым распределением, умноженные на заданную функцию от номера модельного уровня по вертикали. Такие r_{nm} некоррелированы для разных m, n и p и имеют заданную корреляцию по вертикали [24]. Дисперсии величин r_{nm} задаются константами так, чтобы полученный шум имел заданный радиус корреляции по горизонтали и вертикали и заданную дисперсию. Радиус корреляции и дисперсия сгенерированного шума настраиваются в зависимости от модельного уровня h , широты и переменной p .

1.2. Центрирование ансамбля анализов

Для повышения точности ансамблевого прогноза привлекается дополнительная информация – оперативные анализы Гидрометцентра России.

Пусть $\{x_1^a, \dots, x_{N_f}^a\}$ – ансамбль анализов, сгенерированный ансамблевой системой

усвоения на основе LETKF, $\bar{x}^a = \frac{\sum_1^{N_f} x_1^a}{N_f}$ – средний по ансамблю анализ. Пусть x^{op} – оперативный анализ Гидрометцентра. Тогда элементы центрированного ансамбля x_i^{ac} можно получить следующим образом:

$$x_i^{ac} = x_i^a + (x^{op} - \bar{x}^a). \quad (7)$$

Оперативный анализ Гидрометцентра задан на p -уровнях на сетке с шагом 0,5 градуса по широте и долготе. Для использования в блоке центрирования оперативный анализ Гидрометцентра сначала интерполируется на модельную сетку, затем вычисляется центрированный ансамбль анализов.

1.3. Модель атмосферы ПЛАВ

Глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ (от ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности, в английском варианте – SL-AV) разработана в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России.

Модель ПЛАВ состоит из блока решения уравнений динамики атмосферы (далее – динамического ядра) собственной разработки и набора параметризаций процессов подсеточного масштаба, в основном заимствованных.

Особенностями динамического блока являются использование вертикальной компоненты абсолютной завихренности и дивергенции в качестве прогностических переменных, а также применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений. Модельная сетка допускает переменное разрешение по широте [28], именно такой вариант применяется в описываемых далее численных экспериментах. С 2017 года во всех версиях модели применяется гибридная вертикальная координата [10].

Мы используем полунявную схему интегрирования по времени [4] и полулагранжев подход к дискретизации адвективных членов уравнений [27]. Данное сочетание позволяет использовать шаги по времени значительно больше ограничения, определяемого из условия устойчивости Куранта. Практически можно использовать шаг по времени в 3–5 раз больше, чем максимально возможный при использовании эйлеровой схемы расчета адвективных членов и/или явной схемы интегрирования по времени, однако требуется решение задачи типа Гельмгольца на каждом шаге по времени. Используется неразнесенная (несмещенная) сетка по горизонтали. Таким образом, для полулагранжевой схемы расчета адвекции необходимо вычисление только одного семейства обратных траекторий (при использовании смещенной сетки типа «С» [3] требуется три семейства траекторий). Кроме того, точность расчета траекторий на несмещенной сетке выше, чем на смещенной, так как обе компоненты горизонтальной скорости ветра в одних и тех же узлах, следовательно, требуется меньше интерполяций.

Малая численная дисперсия инерционно-гравитационных волн и волн Россби на несмещенной сетке достигается за счет использования в качестве прогностических

переменных вертикальной компоненты относительной завихренности и горизонтальной дивергенции поля скорости ветра (согласно [25]). Это требует восстановления скорости горизонтального ветра по завихренности и дивергенции на каждом шаге по времени. Данная задача эффективно и с высокой точностью решается прямым обращением конечно-разностных определений относительной завихренности и дивергенции [31].

Для вычисления градиента, дивергенции и завихренности используются конечно-разностные формулы четвертого порядка. Уравнение Гельмгольца в модели ПЛАВ решается прямым методом с использованием быстрого преобразования Фурье по долготе. Подробное описание динамического блока модели приведено в [7, 28].

Эффект процессов, происходящих на масштабе более мелком, чем масштаб сетки (например, глубокой конвекции), во всех гидродинамических моделях описывается с помощью известных в моделях значений термодинамических параметров атмосферы на масштабе сетки и ряда введенных из физических соображений зависимостей и параметров. Используемое в моделях описание этих процессов принято называть параметризациями.

В настоящее время блок параметризаций модели ПЛАВ можно условно разделить на три основных части:

– радиационные процессы в атмосфере: применяются свободно распространяемые пакеты CLIRAD SW [13, 29] и RRTMG LW [21] для коротко- и длинноволновой радиации соответственно;

– расчет тепло- и влагообмена в почве с учетом фазовых состояний воды. Эта параметризация описана в следующем разделе;

– описание всех остальных процессов подсеточного масштаба в атмосфере (глубокая и мелкая конвекция, планетарный пограничный слой, гравитационно-волновое сопротивление, образование и выпадение осадков, облачность и пр.) и на поверхности Земли (параметризация тепло- и влагообмена с подстилающей поверхностью с учетом типа растительности, наличия снега и пр.) В этих параметризациях применяются алгоритмы, которые были разработаны под руководством Ж.-Ф. Желена консорциумом по мезомасштабному прогнозу погоды ACCORD /LACE, также называемые ALARO [30]. Эти алгоритмы были адаптированы и уточнены авторами данной статьи.

Для повышения точности описания радиационных потоков в модели ПЛАВ авторами была разработана новая параметризация морских слоисто-кучевых облаков, представленная в [8]. Анализ спутниковых данных показывает, что общий вклад этих облаков в среднегодовой радиационный баланс на верхней границе атмосферы в средних широтах вблизи западного побережья Африки, Австралии, Северной и Южной Америки составляет 50–70 Вт/м² [18].

Важной параметризацией процессов в стратосфере, добавленной в модель, является параметризация сопротивления гравитационных волн конвективного происхождения [16]. Более подробное описание алгоритмов параметризаций см. [7].

1.4. Блок подготовки почвенных переменных

Блок подготовки почвенных переменных выполняет усвоение приземных наблюдений температуры и влажности на сети метеостанций, вычисляя поля приземной температуры и относительной влажности. Алгоритм усвоения основан на схеме оптимальной интерполяции.

Задаваемая для расчета анализа ковариационная матрица ошибок содержит зависимость от расстояния по горизонтали и от разности высот. Функция корреляции имеет следующий вид:

$$\mu_{ij} = \exp\left(\frac{-1}{2} \left[\left(\frac{r_{ij}}{R}\right)^2 + \left(\frac{z_{ij}}{Z}\right)^2 \right]\right), \quad (8)$$

где r_{ij} — расстояние между точками i и j ; z_{ij} — разность высот между точками i и j ;

R — коэффициент, задающий радиус корреляции;

Z — максимальная разность высоты коррелирующих между собой точек.

В реализованном анализе возможно задание различных радиусов корреляции для разных широт, а также различных радиусов корреляции для океана и суши. Радиусы корреляции задаются отдельно для «широтных полос» на суше и для океана. Затем инкременты анализов используются для инициализации температуры и влагосодержания почвы [5].

Этот блок позволяет инициализировать при запуске модели ПЛАВ приземную температуру, влажность и почвенные переменные (поверхностную температуру почвы, температуру глубинного слоя, влагосодержание приповерхностного и глубинного слоя). Блок усвоения почвенных характеристик согласован с применяемой в ПЛАВ параметризацией процессов на поверхности суши с учетом растительности [11, 12, 22] (ISBA, Interaction Soil Biosphere Atmosphere).

В блоке усвоения почвенных переменных в виду отсутствия оперативных наблюдений для параметров почвы для коррекции значений почвенных переменных в каждой точке горизонтальной сетки используются инкременты анализа температуры и влажности на высоте 2 метра. Реализована схема коррекции почвенных переменных, предложенная в [15].

Метод коррекции температуры почвы основан на вычислении инкремента анализа температуры на высоте 2 метров в каждой точке сетки:

$$\Delta T_s = \Delta T_{2m}; \quad \Delta T_p = \frac{\Delta T_{2m}}{\Delta z},$$

где Δ обозначает инкремент, т. е. разность значений анализа и значений первого приближения (6-часовой прогноз, стартовавший 6 часов назад).

Коррекция влагосодержания поверхностного слоя почвы ω_s и основного слоя почвы ω_d линейно вычисляется из разности поля первого приближения и поля анализа для приземных переменных посредством оптимальной интерполяции:

$$\Delta\omega_s = \alpha_s^T \Delta T_{2m} + \alpha_s^H \Delta RH_{2m},$$

$$\Delta\omega_p = \alpha_p^T \Delta T_{2m} + \alpha_p^H \Delta RH_{2m},$$

где α_s^T , α_s^H , α_p^T , α_p^H – оптимальные коэффициенты, минимизирующие среднеквадратичные ошибки температуры и относительной влажности на уровне 2 м, которые зависят от структуры почвы, локального солнечного времени и характеристик подстилающей поверхности.

Для анализа влагосодержания глубинного слоя почвы в применяемой оперативно параметризации ISBA также используется реализация упрощенного расширенного фильтра Калмана (Simplified Extended Kalman Filter – SEKF) [2].

1.5. Блок верификации

Блок верификации позволяет сравнивать полученные ансамбли прогнозов и анализов с фактическим состоянием атмосферы. В качестве фактического состояния атмосферы используются оперативные анализы Гидрометцентра России.

Блок верификации позволяет оценивать среднюю и среднеквадратичную ошибку ансамблевого прогноза, оценивать относительную рабочую характеристику (Relative operating characteristic – ROC score), оценки Брайера и корреляции аномалий. Все оценки рассчитываются в соответствии с рекомендациями ВМО, изложенными в [20].

Кроме этого, блок верификации позволяет рассчитывать отклонение ансамбля анализов и первых приближений от наблюдений. Рассчитываются средние и среднеквадратичные ошибки среднего по ансамблю прогноза и разбросы ансамбля для всех используемых типов наблюдений.

2. Система ансамблевого прогноза

Гидрометцентром России совместно с ИВМ РАН разработана технология глобального ансамблевого среднесрочного прогноза. Технология ансамблевого прогноза построена на базе глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ2018, которая запускается для

каждого элемента ансамбля начальных данных, формируемого с использованием блока генерации возмущений начальных данных. Блок генерации начальных возмущений включен в состав ансамблевой системы усвоения данных.

Основными компонентами системы являются разрабатываемые в лаборатории система усвоения данных на основе Локального ансамблевого фильтра Калмана с переходом в пространство ансамбля (LETKF) и глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ2018, описание которых приводится в разделе 1.

Все компоненты системы ансамблевого прогноза (САП) работают на одной и той же сетке. За основу взята модельная сетка ПЛАВ.

2.1. Особенности реализации системы ансамблевого прогноза

Система ансамблевого прогноза работает циклически с шагом цикла 6 часов. Система состоит из следующих компонент:

- блок подготовки стартового ансамбля на основе алгоритма LETKF,
- блок подготовки почвенных переменных,
- блок центрирования,
- полулагранжева модель атмосферы (ПЛАВ),
- блок верификации.

Все блоки работают на сетке модели ПЛАВ2018. Модель ПЛАВ2018 имеет 96 уровней по вертикали (до уровня 0,04 гПа), разрешение по долготе составляет 0,9 градуса, по широте – 0,72 градуса. По горизонтали сетка регулярная широтно-долготная. По вертикали – гибридная вертикальная координата.

В модели в качестве переменной влажности используется удельная влажность, в остальных блоках – относительная влажность.

Блок подготовки стартового ансамбля может работать в цикле автономно, используя лишь первое приближение, полученное моделью ПЛАВ, и наблюдения. Схема автономной работы в цикле приведена на рис. 1. Однако большая часть спутниковых наблюдений, несущих значительный объем информации о состоянии атмосферы, в настоящее время никак не учитываются. Это приводит к повышенной погрешности анализов при автономной работе системы усвоения (особенно в Южном полушарии, где число усваиваемых наблюдений невелико).

Для повышения точности анализа при циклическом усвоении была привлечена дополнительная информация – оперативные анализы Гидрометцентра России [9], заданные на p -уровнях с пространственным разрешением 0,5 градуса по долготе и широте.

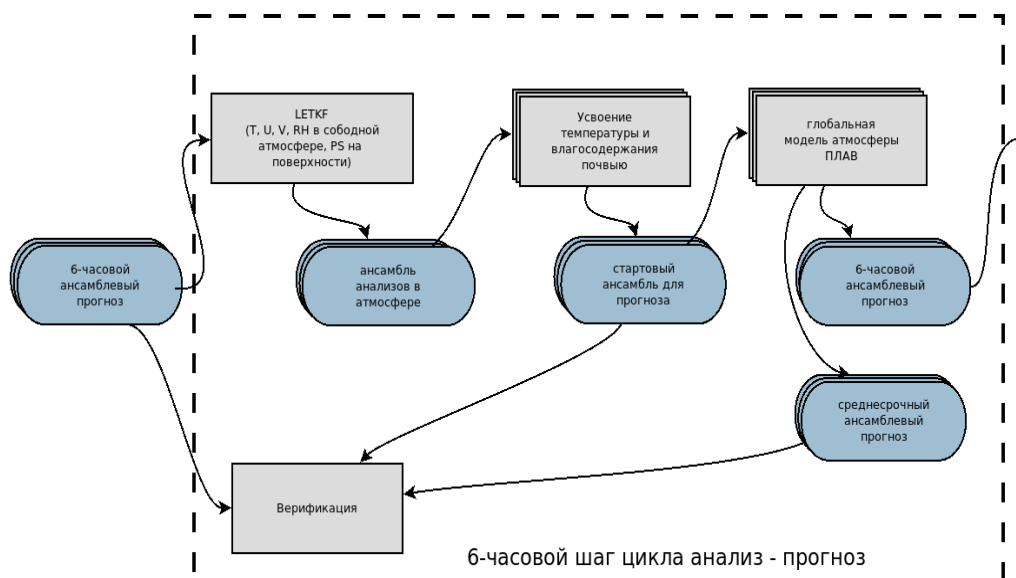


Рис. 1. Схема автономной работы в цикле системы ансамблевого прогноза.

В блоке центрирования ансамбль анализов модифицируется так, чтобы средний по ансамблю анализ совпал с оперативным анализом Гидрометцентра России с сохранением отклонений отдельных анализов из ансамбля от среднего по ансамблю анализа.

Таким образом, среднеквадратичная ошибка ансамблевого прогноза определяется оперативным анализом Гидрометцентра России, а разбросы ансамблей – системой усвоения LETKF. Это приводит к завышению разбросов в тех областях, где количество усваиваемых наблюдений оперативной системой усвоения существенно выше, чем в системе LETKF. Схема работы системы ансамблевого прогноза с центрированием на оперативные анализы Гидрометцентра приведена на рис. 2.

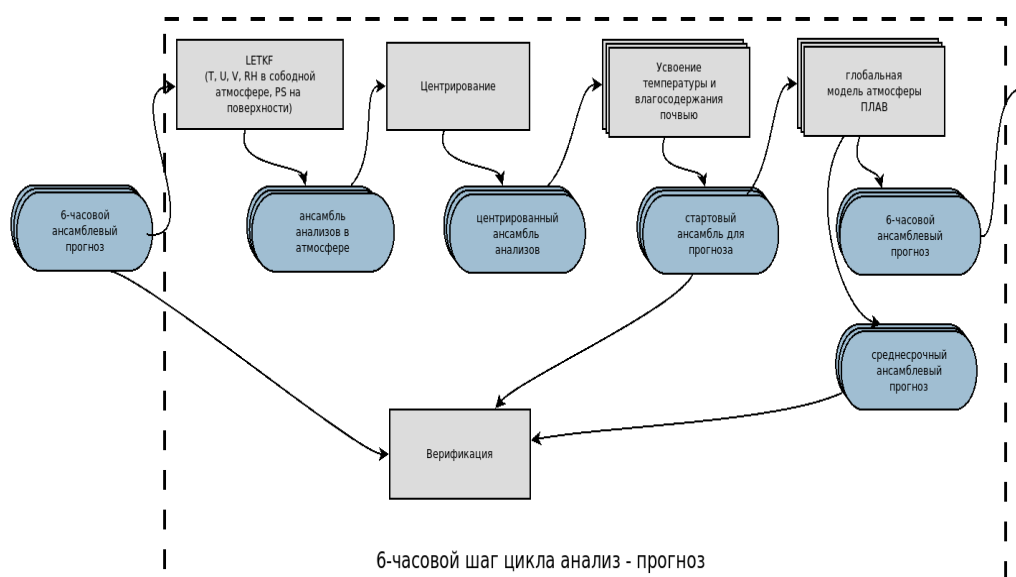


Рис. 2. Схема работы в цикле системы ансамблевого прогноза с центрированием на оперативные анализы Гидрометцентра России.

2.2. Модель ПЛАВ2018

Для расчета ансамблевого прогноза используется полулагранжева глобальная конечно-разностная модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ2018. Модель разработана в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России [6, 7].

Модель ПЛАВ2018 представляет собой усовершенствованную версию глобальной оперативной модели ПЛАВ-20, имеющей более низкое (по сравнению с ПЛАВ20) пространственное разрешение. Усовершенствования состоят в основном в более новых версиях блока описания процессов подсеточного масштаба.

Особенностями атмосферной модели ПЛАВ являются применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений и использование вертикальной компоненты абсолютного вихря и дивергенции в качестве прогностических переменных.

Модель использует набор параметризаций процессов подсеточного масштаба (коротко- и длинноволнового излучения, глубокой и мелкой конвекции, процессов в пограничном слое атмосферы, трения гравитационных волн, обмена тепла и влаги с поверхностью), разработанных международным консорциумом ALADIN/LACE [14]. Применяется параметризация физических процессов подсеточного масштаба на поверхности суши с учетом растительности ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere) [22, 23].

Остальные блоки системы ансамблевого прогноза (система усвоения на основе фильтра LETKF, блок центрирования, блок усвоения почвенных переменных) используют согласованную с моделью горизонтальную сетку, вертикальную координату и количество вертикальных уровней.

2.3. Результаты оперативных испытаний системы ансамблевого прогноза

Оперативные испытания системы ансамблевого прогноза проводились сотрудниками лаборатории глобальных численных прогнозов с декабря 2020 года.

Оценка технологии ансамблевого прогнозирования на основе модели ПЛАВ была произведена для периода с августа 2021 по январь 2022 года. Среднесрочные прогнозы на 10 суток рассчитывались по исходным данным в срок 00 часов ВСВ. В сроки 06, 12, 18 часов ВСВ рассчитывался только ансамбль первых приближений (6-часовой ансамблевый прогноз).

При выполнении испытаний верифицировались 9 стандартных полей, рекомендованных в руководстве по верификации ансамблевых прогнозов ВМО [20]:

- 1) PMSL – давление на уровне моря,

- 2) H500 – высота поверхности 500 гПа,
- 3) T2m – приповерхностная температура (температура на высоте 2 метра над поверхностью),
- 4) T250 – температура на уровне 250 гПа,
- 5) T850 – температура на уровне 850 гПа,
- 6) U250 – зональная компонента скорости ветра на уровне 250 гПа,
- 7) U850 – зональная компонента скорости ветра на уровне 850 гПа,
- 8) V250 – меридиональная компонента скорости ветра на уровне 250 гПа,
- 9) V850 – меридиональная компонента скорости ветра на уровне 850 гПа.

Оценки проводились по полям оперативного объективного анализа Гидрометцентра России (на сетке с шагом 1,5 градуса по широте и долготе). Для каждого из полей рассчитывались оценки Брайера, относительные рабочие характеристики (ROC score – Receiver Operating Characteristic) и площади под ROC кривыми для Северного полушария (20–90° с. ш.), Южного полушария (20–90° ю. ш.) и в тропиках (20° ю. ш. – 20° с. ш.) для положительных аномалий более 2, 1,5 и 1 стандартного отклонения, отрицательных аномалий менее 2, 1,5 и 1 стандартного отклонения.

Ансамблевые показатели успешности прогнозов рассчитываются следующим образом.

- 1) *Показатель упорядоченной непрерывной вероятности* (анг. Continuous ranked probability score – CRPS)

Формула для вычисления:

$$CRPS = \int_{-\infty}^{\infty} (P_{forecast}(x) - P_{obs}(x)) dx, \quad (A.1)$$

где x – значение переменной, для которой считается оценка; $P_{forecast}$ – оценка вероятности спрогнозированного значения; P_{obs} – оценка вероятности наблюдаемого значения.

В случае непрерывных величин CRPS меряет интегральную разность между плотностями вероятностей спрогнозированной и наблюдаемой величин. В идеальном случае равна нулю. Имеет размерность оцениваемой величины. Совпадает с абсолютной ошибкой в случае детерминированного прогноза.

- 2) *Оценка Брайера* (анг. Brier Score – BS)

Формула для вычисления:

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2, \quad (A.2)$$

где N – количество всех наблюдений; p_i – оценка вероятности наступления события; o_i – исход (0 – событие не наступило, 1 – событие наступило).

Меряет средний квадрат вероятностной ошибки. В идеальном случае равна нулю.

3) *Диаграммы надежности* (анг. Reliability diagram – RD)

Строятся путем нанесения для всех вероятностных категорий по оси X спрогнозированной вероятности события, а по оси Y частоты появления события. Показывает, насколько хорошо спрогнозированная вероятность события соответствует наблюдаемой частоте его появления.

4) *Сравнительные оперативные характеристики* (анг. Relative Operating Characteristic – ROC)

На график наносятся доля истинно положительных примеров (по оси Y) и соответствующие доли ложно положительных примеров (по оси X) для некоторого события, посчитанные по многим исходам в пределах одного региона для какого-то определенного периода. Прогноз события тем лучше, чем ближе к верхнему левому углу на графике. В этом случае площадь под кривой (анг. ROC area – ROCA) стремится к единице.

На рис. 3–10 приведены площади под ROC кривыми, полученные по результатам ансамблевых прогнозов полей давления на уровне моря (рис. 3–6), высоты поверхности 500 гПа (рис. 7–10) в зависимости от заблаговременности прогноза (приведены результаты для заблаговременности прогнозов 2, 4, 6, 8, 10 суток – заблаговременности прогнозов приведены в часах на горизонтальной шкале). Результаты рассчитаны для Северного полушария. ROC кривые и площади под кривыми рассчитывались для положительных аномалий более 2 стандартных отклонений (рис. 3, 7), более 1 стандартного отклонения (рис. 4, 8) и отрицательных аномалий менее 2 стандартных отклонений (рис. 5, 9) и менее 1 стандартного отклонения (рис. 6, 10).

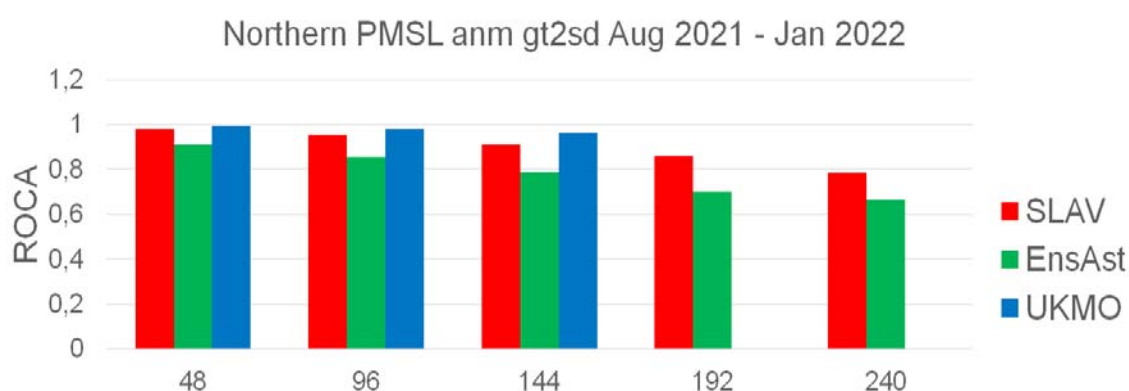


Рис. 3. Площадь под ROC кривой положительной аномалии более 2 стандартных отклонений давления на уровне моря в Северном полушарии.

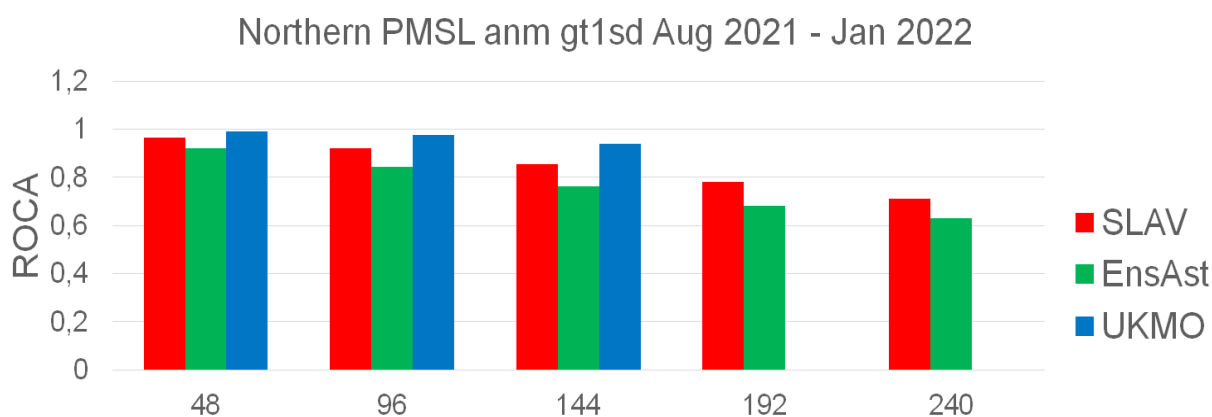


Рис. 4. Площадь под ROC кривой положительной аномалии более 1 стандартного отклонения давления на уровне моря в Северном полушарии.

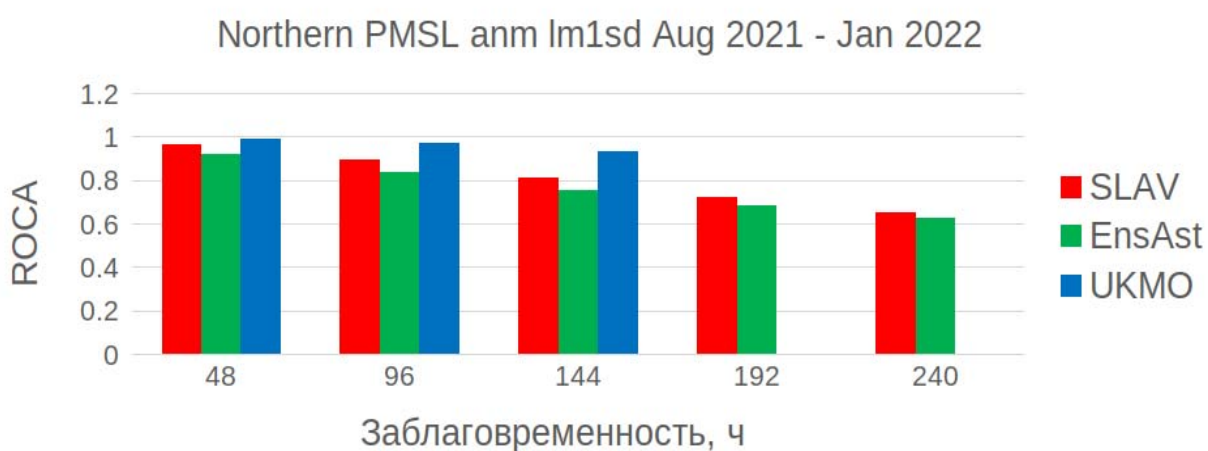


Рис. 5. Площадь под ROC кривой отрицательной аномалии менее 1 стандартного отклонения давления на уровне моря в Северном полушарии.

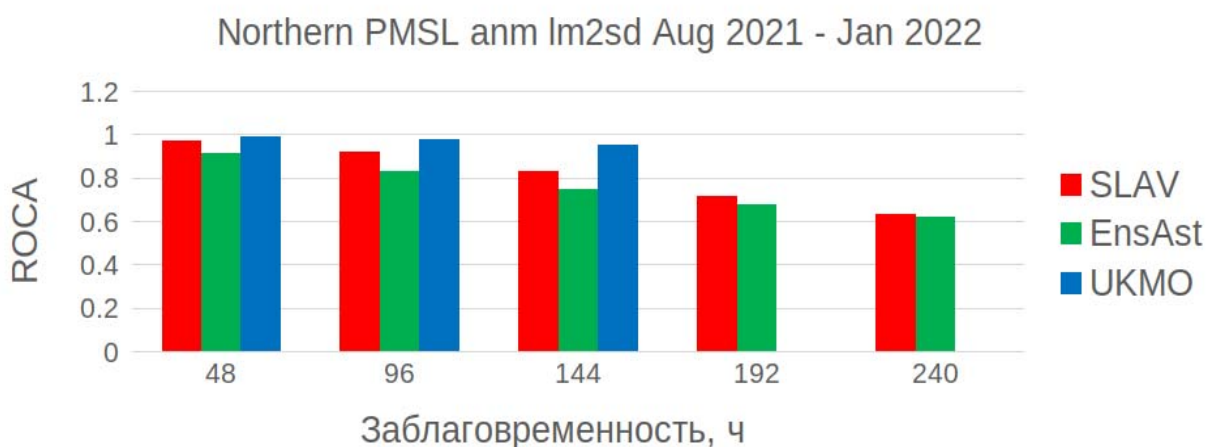


Рис. 6. Площадь под ROC кривой отрицательной аномалий менее 2 стандартных отклонений давления на уровне моря в Северном полушарии.

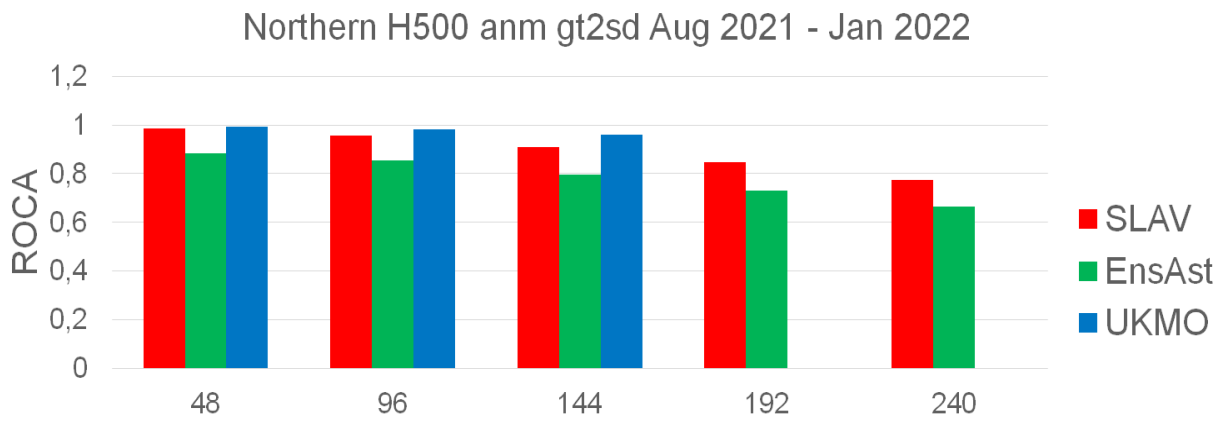


Рис. 7. Площадь под ROC кривой положительных аномалий более 2 стандартных отклонений высоты поверхности 500 гПа в Северном полушарии.

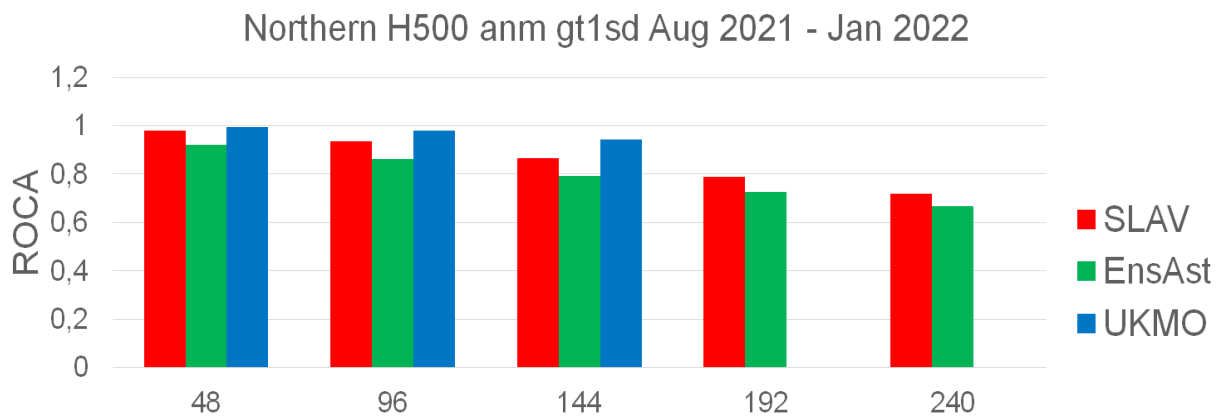


Рис. 8. Площадь под ROC кривой положительных аномалий более 1 стандартного отклонения высоты поверхности 500 гПа в Северном полушарии

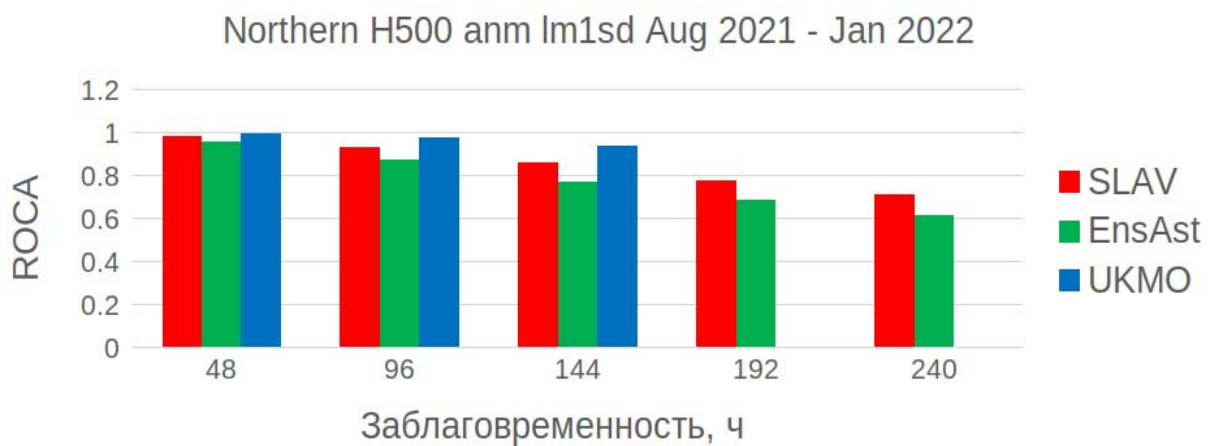


Рис. 9. Площадь под ROC кривой отрицательных аномалий менее 1 стандартного отклонения высоты поверхности 500 гПа в Северном полушарии.

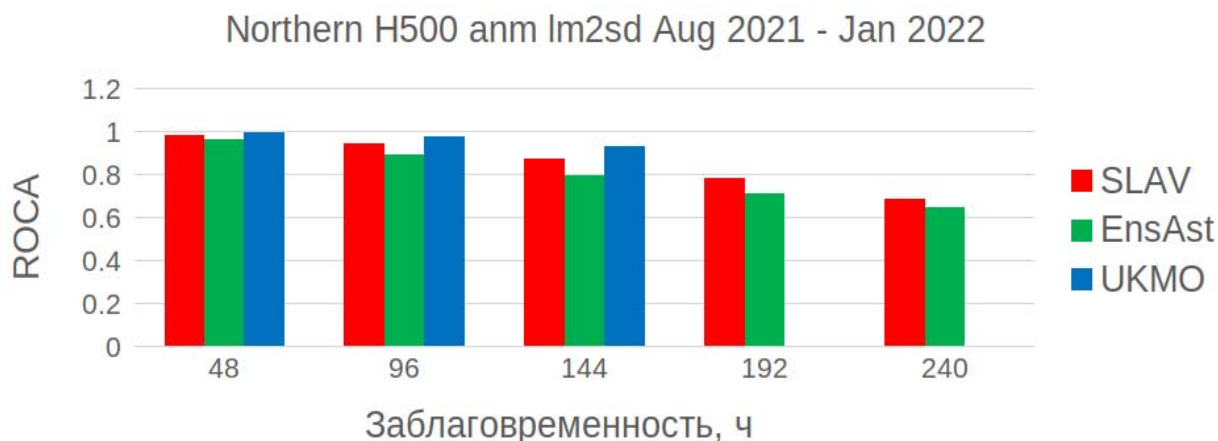


Рис. 10. Площадь под ROC кривой отрицательных аномалий менее 2 стандартных отклонений высоты поверхности 500 гПа в Северном полушарии.

Для сравнения вместе с результатами, полученными на испытаниях для САП на основе модели ПЛАВ и ансамблевой системы усвоения на основе LETKF (на рисунках отмечена как SLAV, столбцы красного цвета), приведены площади под ROC кривыми этих же полей, полученные для САП на основе спектральной модели T169L31 [1] (EnsAst, зеленый цвет на рисунках) и площади под ROC кривыми, полученные для системы ансамблевого прогноза UKMO (синий цвет на рисунках). Оценки для систем ансамблевого прогноза UKMO и EnsAst были взяты с сайта Главного центра верификации систем ансамблевого прогноза [<http://epsv.kishou.go.jp/EPSv>].

Как видно из рисунков, площади под ROC кривыми поля приземного давления системы ансамблевого прогноза на основе ПЛАВ в Северном полушарии заметно превосходят результаты системы ансамблевого прогноза на основе спектральной модели T169L31, но уступают системе UKMO для всех заблаговременностей прогнозов.

Оценки, рассчитанные по прогнозам САП ПЛАВ для отрицательных аномалий, убывают быстрее, чем оценки прогнозов САП ПЛАВ, рассчитанные для положительных аномалий.

При небольшой заблаговременности прогноза качество прогноза высоты геопотенциала H500 в САП ПЛАВ почти не уступает САП UKMO, но с ростом заблаговременности прогноза качество прогнозов САП ПЛАВ убывает быстрее.

На рис. 11 и 12 приведены оценки Брайера, рассчитанные по результатам ансамблевых прогнозов полей давления на уровне моря в зависимости от заблаговременности прогноза (приведены результаты для заблаговременности прогнозов 2, 4, 6, 8, 10 суток – заблаговременности прогнозов приведены в часах на горизонтальной шкале). Для сравнения вместе с результатами, полученными на испытаниях для описываемой в данной работе

системы ансамблевого прогноза (на рисунках отмечена как SLAV, столбцы красного цвета), приведены оценки Брайера этих же полей, полученные для САП Гидрометцентра на основе спектральной модели [1] (EnsAst, зеленый цвет на рисунках) и оценки Брайера, полученные для системы ансамблевого прогноза UKMO (синий цвет на рисунках). Оценки Брайера для систем ансамблевого прогноза UKMO и EnsAst были взяты с сайта Главного центра верификации систем ансамблевого прогноза [<http://epsv.kishou.go.jp/EPsv>].

Для заблаговременностей прогнозов 8 и 10 суток оценки Брайера системы ансамблевого прогноза UKMO не приведены, так как они отсутствуют на сайте центра верификации.

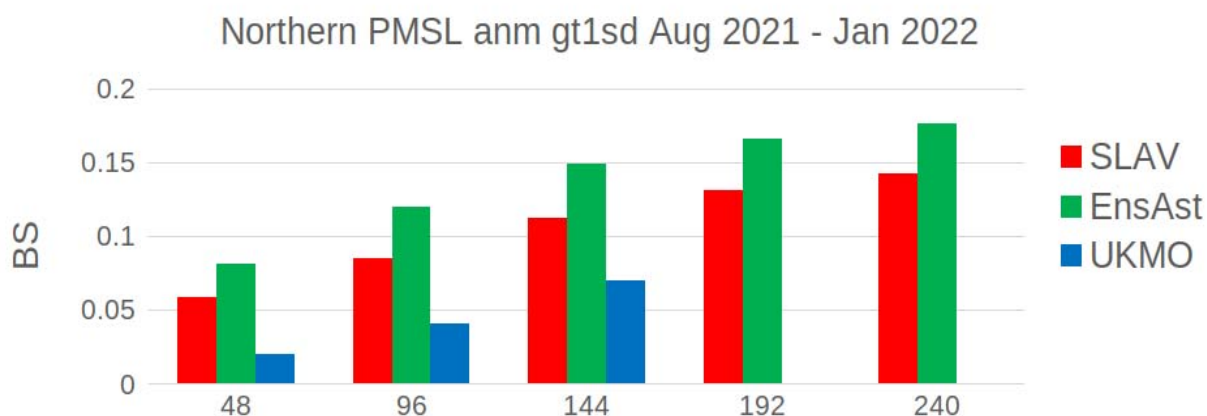


Рис. 11. Оценки Брайера положительных аномалий более 1 стандартного отклонения давления на уровне моря в Северном полушарии.

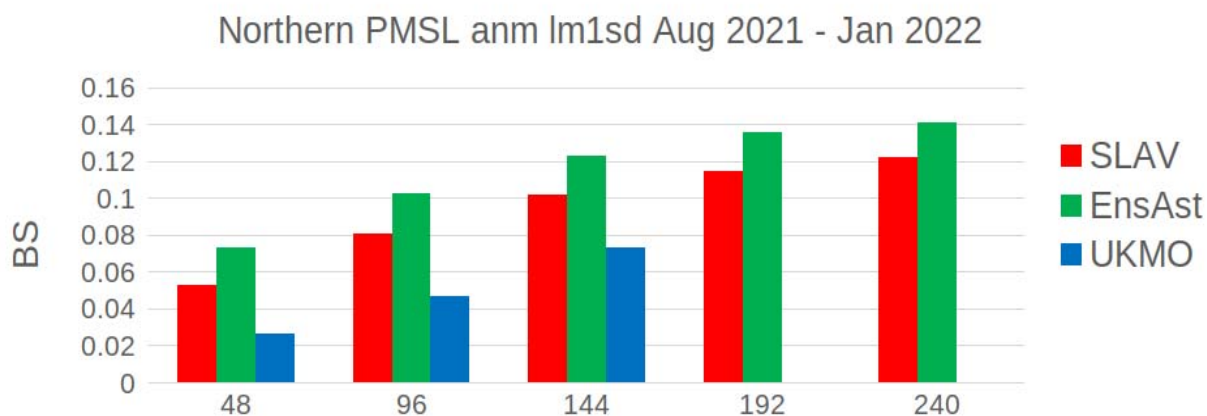


Рис. 12. Оценки Брайера отрицательных аномалий менее 1 стандартного отклонения давления на уровне моря р0 в Северном полушарии.

Как видно из рисунков, показатели Брайера поля приземного давления системы ансамблевого прогноза на основе модели ПЛАВ в Северном полушарии заметно превосходят результаты системы на основе спектральной модели T169L31, но уступают системе UKMO для всех заблаговременностей прогнозов.

На рис. 13 приведены площади под ROC кривыми, полученные по результатам ансамблевых прогнозов в Южном полушарии (20–90° ю. ш.) в зависимости от заблаговременности прогноза (приведены результаты для заблаговременности прогнозов 2, 4, 6, 8, 10 суток – заблаговременности прогнозов приведены в часах на горизонтальной шкале).

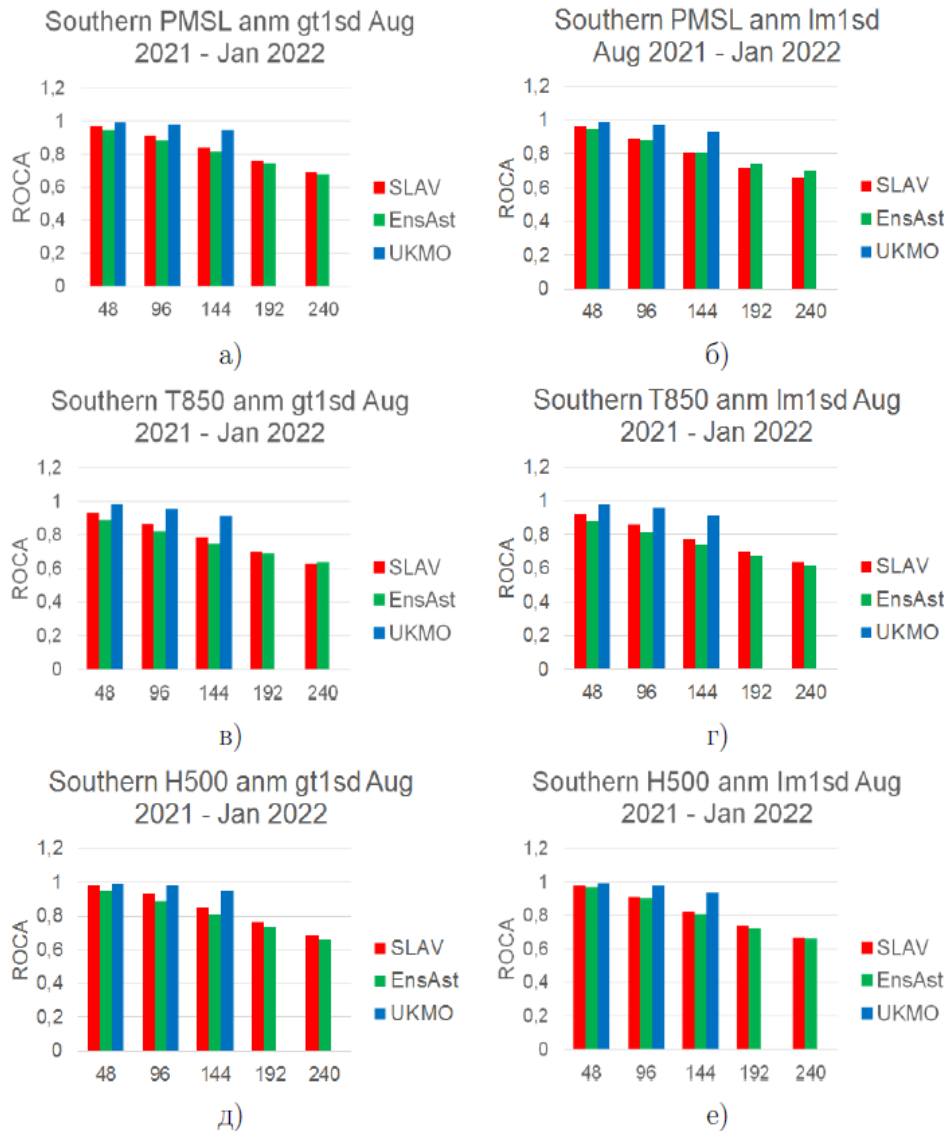


Рис. 13. Площади под ROC кривыми, рассчитанные для положительных аномалий более 1 стандартного отклонения (а, в, д) и отрицательных аномалий менее 1 стандартного отклонения (б, г, е) полей приземного давления (а, б), температуры на уровне 850гПа (в, г) и высоты поверхности H500 (д, е) в Южном полушарии по результатам ансамблевых прогнозов САП ПЛАВ (красные столбцы), САП на основе спектральной модели T169L31 (зеленые столбцы) и САП UKMO (синие столбцы). На горизонтальной шкале – заблаговременность прогноза в часах.

ROC кривые строились для положительных аномалий больше 1 стандартного отклонения (рис. 13а, в, д) и отрицательных аномалий менее 1 стандартного отклонения (рис. 13б, г, е) для ансамблевых прогнозов полей приземного давления, температуры на

уровне 850 гПа и высоты поверхности 500 гПа. Для сравнения вместе с результатами, полученными на испытаниях для описываемой в данной работе системы ансамблевого прогноза (на рисунках отмечена как SLAV, столбцы красного цвета), приведены площади под ROC кривыми этих же полей, полученные с использованием САП Гидрометцентра России на основе спектральной модели [1] (EnsAst, зеленый цвет на рисунках) и площади под ROC кривыми, полученные для системы ансамблевого прогноза UKMO (синий цвет на рисунках). Оценки для систем ансамблевого прогноза UKMO и EnsAst были взяты с сайта Главного центра верификации систем ансамблевого прогноза [<http://epsv.kishou.go.jp/EPsv>].

На рисунках видно, что в Южном полушарии ансамблевые прогнозы ПЛАВ превосходят ансамблевые прогнозы на основе спектральной модели T169L31, но уступают прогнозам UKMO (исключение – отрицательные аномалии менее 1 стандартного отклонения поля приземного давления (PMSL на рисунках) при заблаговременности прогноза 8 и 10 суток). Качество прогнозов ПЛАВ с ростом заблаговременности прогноза убывает быстрее, чем в системе UKMO. Для всех заблаговременностей и всех полей ансамблевый прогноз САП UKMO превосходит по качеству САП ПЛАВ. С ростом заблаговременности прогноза качество прогнозов САП ПЛАВ убывает быстрее. Наиболее заметна разница в качестве прогнозов для поля T850. Этот недостаток может быть частично связан с недостаточным пространственным разрешением модели ПЛАВ2018. Качество прогнозов САП ПЛАВ убывает с ростом заблаговременности прогноза немного быстрее, чем САП на основе спектральной модели T169L31.

На рис. 14 приведены площади под ROC кривыми, полученные по результатам ансамблевых прогнозов в тропиках (20° ю. ш. – 20° с. ш.) в зависимости от заблаговременности прогноза (приведены результаты для заблаговременности прогнозов 2, 4, 6, 8, 10 суток – заблаговременности прогнозов приведены в часах на горизонтальной шкале). ROC кривые строились для положительных аномалий более 1 стандартного отклонения (рис. 14а, в, д) и отрицательных аномалий меньше 1 стандартного отклонения (рис. 14 б, г, е) для ансамблевых прогнозов полей приземного давления, температуры на уровне 850 гПа и высоты поверхности 500 гПа. Для сравнения вместе с результатами, полученными на испытаниях для описываемой в данной работе системы ансамблевого прогноза (на рисунках отмечена как SLAV, столбцы красного цвета) приведены площади под ROC кривыми этих же полей, полученные с использованием САП Гидрометцентра России на основе спектральной модели [1] (EnsAst, зеленый цвет на рисунках) и площади под ROC кривыми, полученные для системы ансамблевого прогноза UKMO (синий цвет на рисунках). Оценки для систем ансамблевого прогноза UKMO и EnsAst были взяты с сайта Главного центра верификации систем ансамблевого прогноза [<http://epsv.kishou.go.jp/EPsv>].

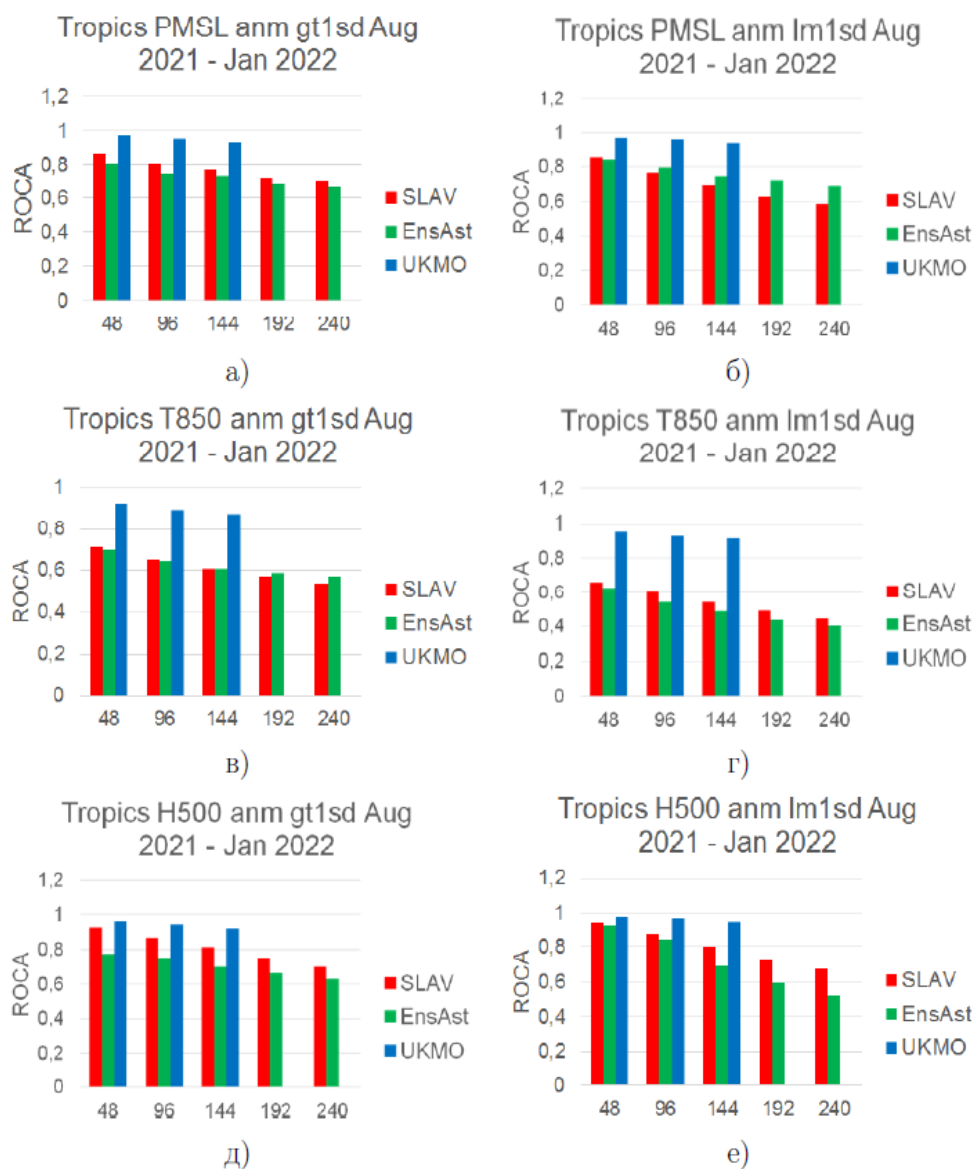


Рис. 14. Площади под ROC кривыми, рассчитанные для положительных аномалий величиной более 1 стандартного отклонения (а, в, д) и менее 1 стандартного отклонения (б, г, е) полей приземного давления (а, б), температуры на уровне 850гПа (в, г) и высоты поверхности H500 (д, е) в тропиках по результатам ансамблевых прогнозов САП ПЛАВ (красные столбцы), САП на основе спектральной модели T169L31 (зеленые столбцы) и САП UKMO (синие столбцы).
На горизонтальной шкале – заблаговременность прогноза в часах.

Как видно на рисунках, в тропиках ансамблевые прогнозы САП на основе ПЛАВ заметно уступают прогнозам САП UKMO для всех заблаговременностей и всех приведенных переменных. Особенно заметна разница в качестве прогнозов поля T850, что может объясняться недостаточным пространственным разрешением модели ПЛАВ2018. Площади под ROC кривыми прогноза САП ПЛАВ поля H500 почти не уступает прогнозу САП UKMO при небольшой заблаговременности прогноза (меньше 2 суток), но качество прогноза САП ПЛАВ быстро убывает с ростом заблаговременности. Площади под ROC кривыми прогнозов САП ПЛАВ убывают быстрее, чем в САП на основе спектральной модели T169L31.

Выводы

В период испытаний производилось сравнение успешности ансамблевых прогнозов по модели ПЛАВ2018 с успешностью ансамблевых прогнозов по глобальной спектральной модели Гидрометцентра России Т169L31, а также с прогнозами зарубежных метеоцентров (английского УКМО). Испытания показали высокую надежность функционирования созданной технологии ансамблевых прогнозов на базе модели ПЛАВ2018 и системы усвоения данных с использованием ансамблевого фильтра Калмана.

Результаты показывают существенно более высокую успешность прогноза для полей геопотенциала, температуры, давления на уровне моря, рассчитываемых системой на основе модели ПЛАВ2018, для всех заблаговременностей, уровней, территорий, метрик детерминистических и вероятностных оценок (за редкими исключениями) по сравнению с системой ансамблевого прогнозирования на базе спектральной модели Т169L31.

Успешность вероятностных прогнозов по созданной технологии ансамблевых прогнозов на базе модели ПЛАВ2018 для внетропической части Северного и Южного полушарий для ряда заблаговременностей прогноза (для отдельных регионов и оцениваемых переменных) сопоставима с успешностью вероятностных прогнозов по модели УКМО по критерию ROCA, но уступает прогнозам УКМО для других заблаговременностей и существенно уступает им в тропиках.

Точность вероятностных прогнозов по созданной технологии ансамблевых прогнозов на базе модели ПЛАВ2018 по оценке Брайера в большинстве случаев уступает точности прогнозов технологии УКМО.

Решение ЦМКП от 9 июня 2022 г.:

- внедрить метод ансамблевого прогноза на основе ПЛАВ2018 в качестве вспомогательного метода среднесрочного прогноза;
- авторам продолжить работу по усовершенствованию технологии ансамблевых прогнозов на базе модели ПЛАВ.

Список литературы

1. 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 // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – № 43. – С. 63–79.
2. Махнорылова С.В., Толстых М.А. Усвоение косвенных данных о влагосодержании почвы методом упрощенного расширенного фильтра Калмана в модели среднесрочного прогноза ПЛАВ // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 6. – С. 55–67.

3. Мезингер Ф., Аракава А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Т.1 // Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 89 с.
4. Робер А. Полуявный метод // Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Т.2: пер. с англ. под ред. В.П. Садокова. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – С. 302–315.
5. Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Мизяк В.Г. Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 170–180.
6. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н. и др. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 6. – С. 25–35.
7. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Розутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза / Рецензент д.ф.-м.н. А.В. Старченко. – М.: Триада лтд, 2017. – 166 с.
8. Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Володин Е.М. Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: разработка и первые результаты // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 1. – С. 22–35.
9. Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Багров А.Н. Новая технология циклического усвоения данных на основе схемы анализа 3D-var // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – № 43. – С. 3–12.
10. Шашкин В.В., Толстых М.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Версия модели атмосферы ПЛАВ в гибридной системе координат по вертикали // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 9. – С. 24–35.
11. Bazile E., Haitl M.El, Bogatchev A., Spiridonov V. Improvement of the snow parameterization in ARPEGE/ALADIN. Proceedings of SRNWP // HIRLAM Workshop on Surface Processes, Turbulence and Mountain Effects; Madrid, 22–24 October 2001. – January 2002.
12. Boone A., Masson V., Meyers T., Noilhan J. The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme // J. Appl. Meteor. – 2000. – Vol. 9. – P. 1544–1569.
13. Chou M.-D., Suarez M.J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies // NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD (NASA Tech. Memo. 10460). – 1999. – Vol. 15. – 48 p.
14. Geleyn J.-F. , Bazile E. , Bougeault P., Deque M. , Ivanovici V., Joly A., Labbe L., Piedelievre J.-P., Piriou J.-M., Royer J.-F. Atmospheric parameterization schemes in Meteo-France's ARPEGE N.W.P. model // Parameterization of subgrid-scale physical processes, ECMWF Seminar proceedings. – Reading, UK. – 1994. – P. 385–402.
15. Giard D., Bazile E. Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model // Mon. Wea. Rev. – 2000. – Vol. 128. – P. 997–1015.
16. Hines C.O. Doppler-spread parameterization of gravity-wave momentum deposition in the middle atmosphere. Part 1: Basic formulation // J. Atm. & Solar-Terrestrial Phys. – 1997. – Vol. 59, № 4. – P. 371–386.

17. *Hunt B.R., Kostelich E.J., Szunyogh I.* Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. – 2007. – № 230(1–2). – P. 112–126.
18. *Loeb N.G., Wielicki B.A., Doelling D.R., Smith G.L., Keyes D.F., Kato S., Manalo-Smith N., Wong Takmeng.* Toward optimal closure of the Earth's top-of-atmosphere radiation budget // *J. Climate*. – 2009. – Vol. 22. – P. 748–766.
19. *Machenhauer B.* Spectral Methods // Seminar on Numerical Methods in Atmospheric Models. – ECMWF, Reading, UK. – 1991. – P. 3–85.
20. Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. // Annex IV to the WMO Technical Regulations. – 2019. – Updated in 2021. – Vol. 485.
21. *Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A.* RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102, № 16. – P. 663–682.
22. *Noilhan J., Mahfouf J.-F.* The ISBA land surface parameterization scheme // *Global Planet. Change*. – 1996. – Vol. 13, № 1–4. – P. 145–159.
23. *Noilhan J., Planton S.* A simple parameterization of land surface processes for meteorological models // *Mon. Wea. Rev.* – 1989. – Vol. 117. – P. 536–549.
24. *Palmer T., Buizza R., Doblas-Reyes F. et al.* Stochastic Parametrization and Model Uncertainty // Technical Memoranda. – ECMWF. – 2009. – Vol. 598. – P. 1–42.
25. *Randall D.A.* Geostrophic adjustment and the finite-difference shallow water equations // *Mon. Wea. Rev.* – 1991. – Vol. 122. – P. 1371–1377.
26. *Shlyayeva A., Tolstykh M., Mizyak V., Rogutov V.* Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model // *Russ. J. Num. An. & Math. Mod.* – 2013. – Vol. 28, № 4. – P. 419–441.
27. *Staniforth A., Côté J.* Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models – A review // *Mon. Wea. Rev.* – 1991. – Vol. 119. – P. 2206–2223.
28. *Tolstykh M., Shashkin V., Fadeev R., Goyman G.* Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: dynamical core // *Geosci. Model Dev.* – 2017. – Vol. 10. – P. 1961–1983.
29. *Tarasova T., Fomin B.* The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models // *J. Atmos. Oceanic Techn.* – 2007. – Vol. 24, № 6. – P. 1157–1162.
30. *Termonia P., Fischer C., Bazile E., Bouyssel F., Brozková R., Bénard P., Bochenek B., Degrauwe D., Derková M., Khatib R. E., Hamdi R., Mašek J., Pottier P., Pristov N., Seity, Y.; Smoliková P., Španiel O., Tudor M., Wang Y., Wittmann C., Joly A.* The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1 // *Geosci. Mod. Devel.* – 2018. – Vol. 11. – P. 257–281.
31. *Tolstykh M., Shashkin V.* Vorticity-divergence mass-conserving semi-Lagrangian shallow-water model using the reduced grid on the sphere // *J. Comput. Phys.* – 2012. – Vol. 231 – P. 4205–4233.