

# Опытная система ансамблевого прогноза на основе Локального ансамблевого фильтра Калмана и модели ПЛАВ.

Рогутов В.С<sup>1</sup>., Толстых М.А<sup>1,2</sup>., Мизяк В.Г<sup>1</sup>.

1 — ФГБУ Гидрометцентр России

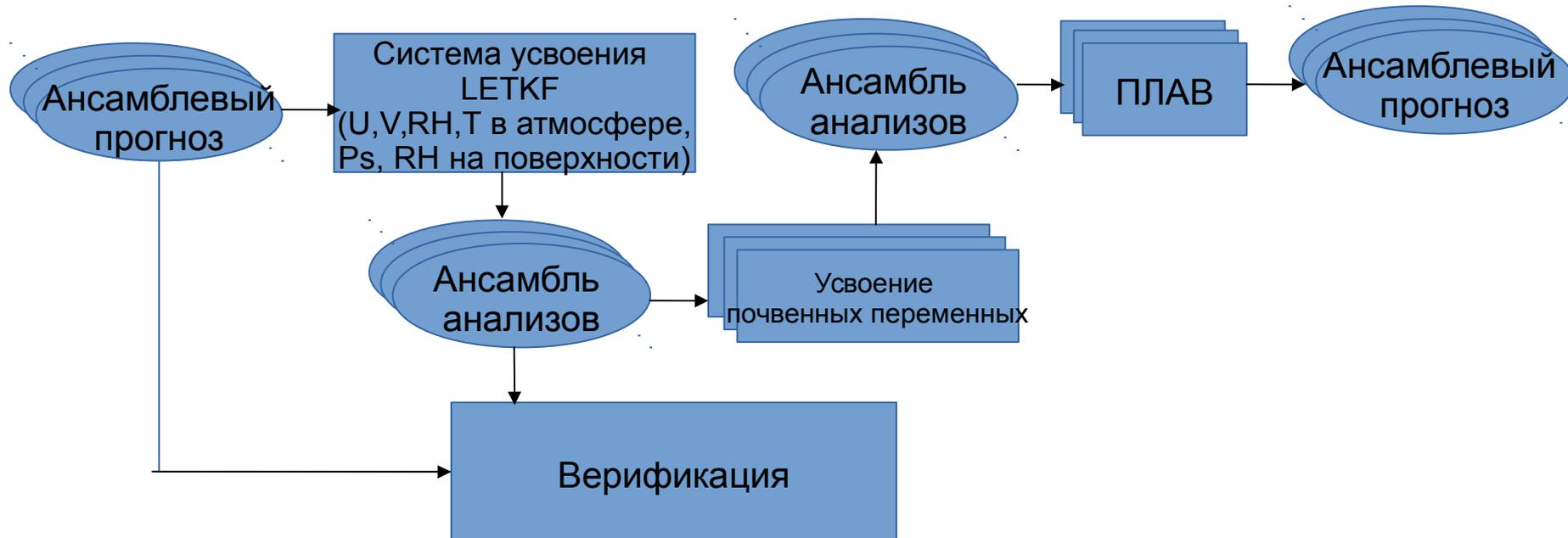
2 — ИВМ РАН

# Ансамблевый прогноз.

- Запускаем несколько прогнозов с ансамбля начальных состояний, разброс которых совпадает с погрешностью начального состояния.
- Ансамблевый прогноз позволяет:
  - 1) Оценить погрешность прогноза.
  - 2) Оценить вероятность событий.
  - 3) Получить дополнительную информацию (повысить отношение сигнал/шум).

# Опытная система ансамблевого прогноза.

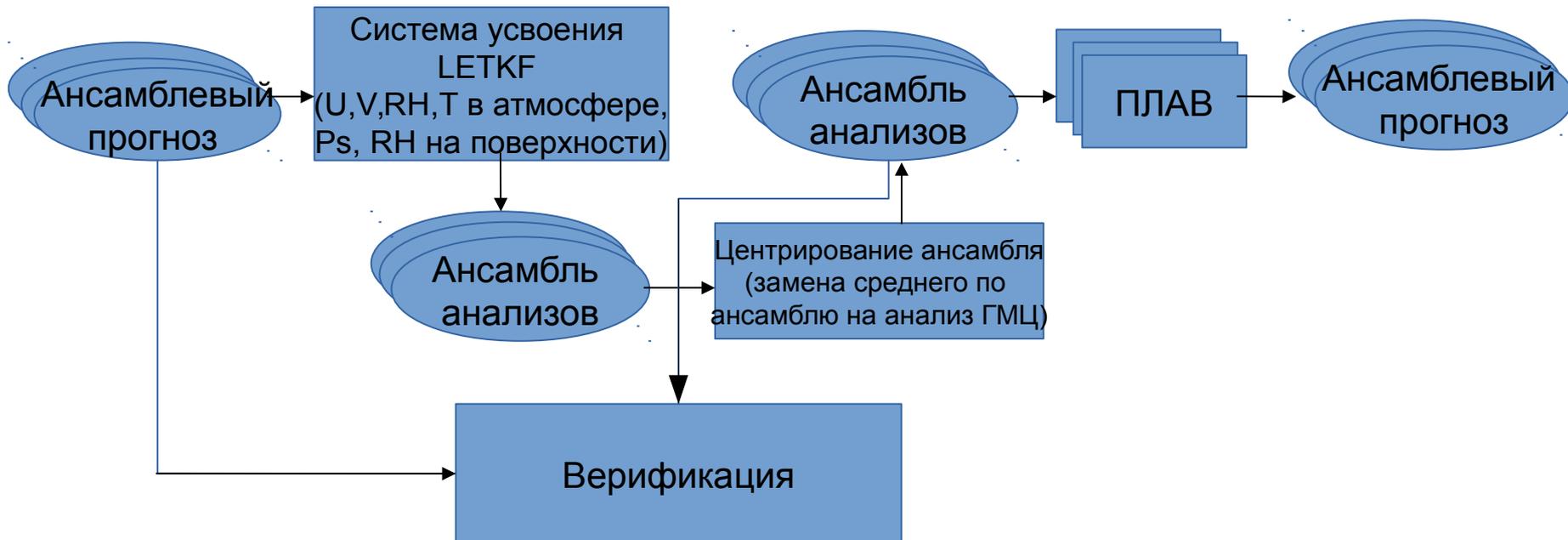
- Система ансамблевого прогноза может работать в цикле автономно (используя лишь данные наблюдений).
- Включает:
  - Систему усвоения на основе LETKF (усвоение переменных в свободной атмосфере —  $U, V, T, RH$  и на поверхности —  $P_s, RH$ ).
  - Вариационное усвоение почвенных переменных.
  - Глобальную полулагранжевую модель атмосферы ПЛАВ
  - Систему верификации прогнозов.



# Опытная система ансамблевого прогноза.

Большая часть спутниковых наблюдений не усваиваются.

- Для повышения точности используем оперативные анализы ГМЦ.
- Мы заменяем средний анализ, полученный LETKF на оперативный анализ ГМЦ. Это позволяет уменьшить СКО среднего по ансамблю прогноза, при этом увеличивается разница между разбросом ансамбля и СКО.



# Ансамблевый прогноз – ПЛАВ.

Используется версия модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением 0.72x0.9 градуса по широте и долготе, 28 уровней по вертикали.

Особенности модели:

использование конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых

использование вертикальной компоненты абсолютного вихря и горизонтальной дивергенции в качестве прогностических переменных.

набор параметризаций процессов подсеточного масштаба ADADIN/LACE.

# LETKF (Hunt, 2007).

В LETKF матрицы ковариаций аппроксимируются с помощью ансамблей. Средний анализ и ансамбль анализов ищем в виде линейной комбинации первых приближений. Вычисления — в пространстве ансамбля первых приближений.

$$\begin{aligned}\tilde{P}^a &= \left[ (k-1)I + (HX^b)^T R^{-1} (HX^b) \right]^{-1} \\ \bar{x}^a &= \bar{x}^b + X^b \tilde{P}^a (HX^b)^T R^{-1} (y - H\bar{x}^b) \\ X^a &= X^b [(k-1)\tilde{P}^a]^{1/2}\end{aligned}$$

$X^b = [x_1^b - \bar{x}^b, \dots, x_K^b - \bar{x}^b]$  - Матрица ансамбля первого приближения  
 $X^a = [x_1^a - \bar{x}^a, \dots, x_K^a - \bar{x}^a]$  - Матрица ансамбль анализа

$P^b = X^b (X^b)^T / (K-1)$ , - матрицы ковариации ошибок  
 $P^a = X^a (X^a)^T / (K-1)$

Здесь  $x^b$  – первое приближение:

$y, R$  – вектор наблюдений и матрица ковариации ошибок наблюдений.

# Особенности реализации системы усвоения на основе LETKF.

## Локализация.

- Независимые вычисления для каждого узла сетки.
- Используются локальные наблюдения.
- Элементы матрицы  $R^{-1}$  поэлементно умножаются на убывающую функцию  $f(r/c)$ , где  $r$  - расстояние между узлом анализа и наблюдением,  $c$  - радиус корреляции. В качестве функции используется корреляционная функция Гаспари – Кона.

**Мультипликативная инфляция:**  $\tilde{P}^a = [(k-1)\rho^{-1}I + (HX^b)^T R^{-1} (HX^b)]^{-1}$

**Аддитивная инфляция:** Добавление сгенерированного шума к полученным участникам ансамбля.

Шум — сумма сферических функции, с заданной дисперсией и радиусом корреляции, скоррелированные по высоте и независимые для разных переменных.

Реализован учет корреляции ошибок наблюдений (в системе ансамблевого прогноза не используется).

# Особенности реализации системы усвоения на основе LETKF(2).

## Усваиваются наблюдения:

- 1) SYNOP, SYNSHIP - наблюдения на метеостанциях и кораблях (около 10000 наблюдений U, V, T, Ps, RH в 00, 06, 12 и 18 ).
- 2) TEMP - радиозондовые наблюдения ( U, V, T, RH на 16 р-уровнях, около 600-700 наблюдений в 00 и 12 UTS., 70-90 в 06 и 18 UTS).
- 3) AIREP самолетные наблюдения (U, V, около 4000-11000 наблюдений).
- 4) SATOB (более 20000) – спутниковые наблюдения скорости ветра.
- 5) AMV – спутниковые наблюдения скорости ветра ( $2 \cdot 10^5 - 2.5 \cdot 10^5$ ).
- 6) ASCAT – спутниковые наблюдения скорости приводного ветра. (около  $4 \cdot 10^5 - 7 \cdot 10^5$  наблюдений)

# Усвоение почвенных переменных.

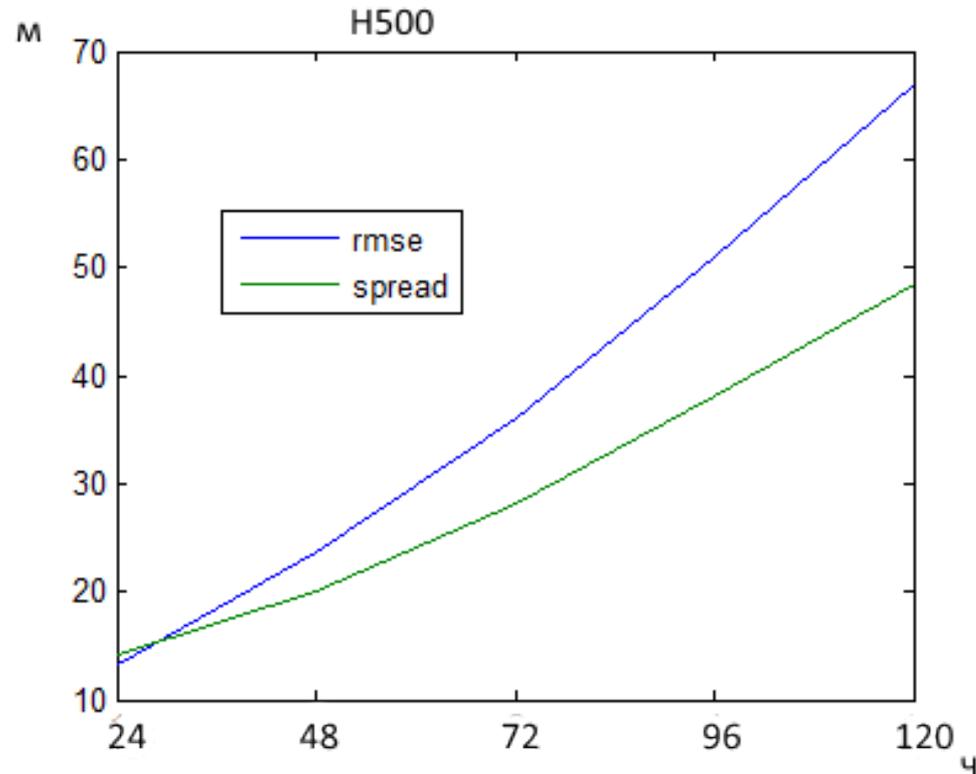
- Инициализация приземной температуры, влажности и почвенных переменных (температуры и влажности).
- Согласована с применяемой в ПЛАВ параметризацией процессов на поверхности суши с учетом растительности
- Реализована схема коррекции почвенных переменных, (D.Giard и E.Bazile).

# Численные эксперименты.

- Система усвоения генерирует ансамбль анализов, затем средний анализ заменяем на оперативный анализ ГМЦ. Размер ансамбля – 40 участников.
- Усвоение в цикле с 24 ноября 2016 года (ансамбль прогнозов на 6 часов + ансамбль анализов).
- Для 01-31 декабря 2016 г. в 0 часов UTC. рассчитываются ансамблевые прогнозы на 5 суток.

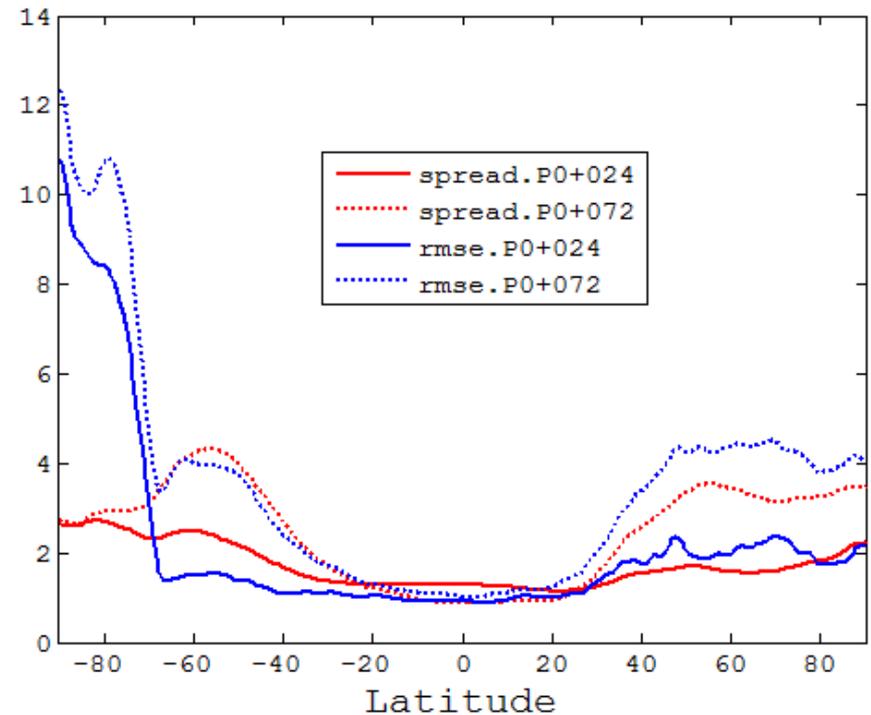
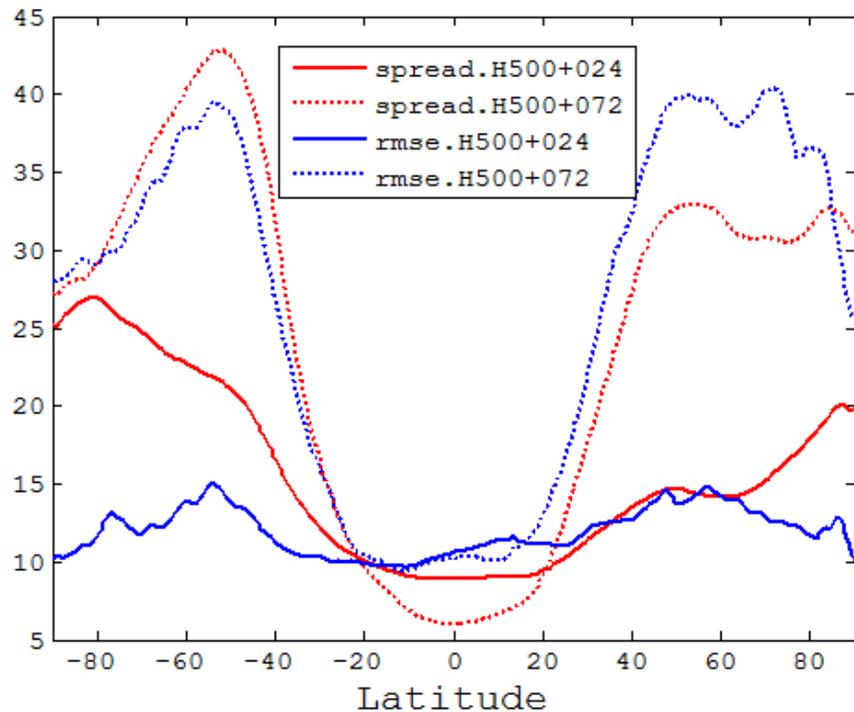
# Результаты численных экспериментов.

Зависимость среднего разброса ансамбля и RMSE в северном полушарии ( $20^\circ$  –  $90^\circ$  с.ш.) поля H500 в зависимости от заблаговременности прогноза.



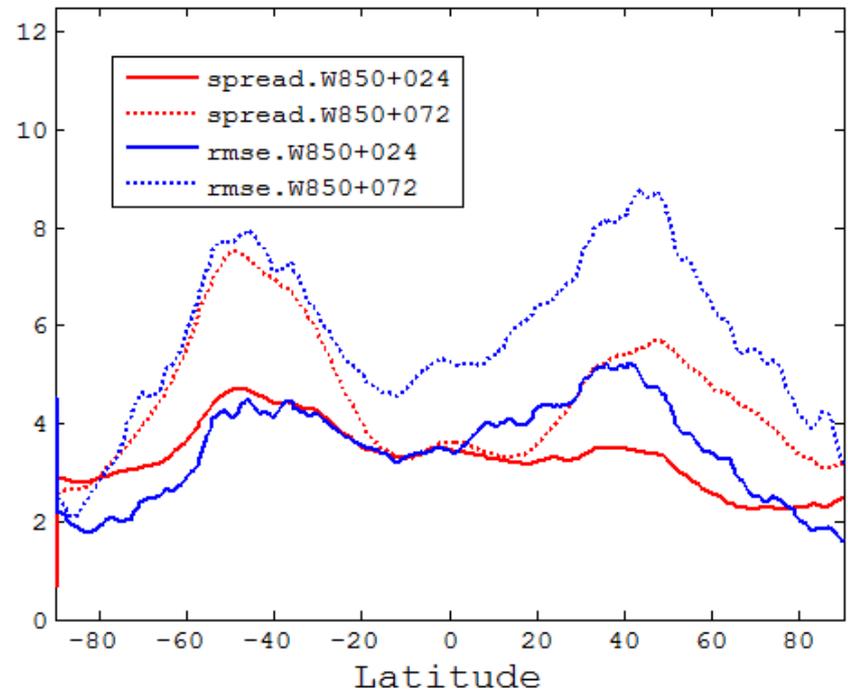
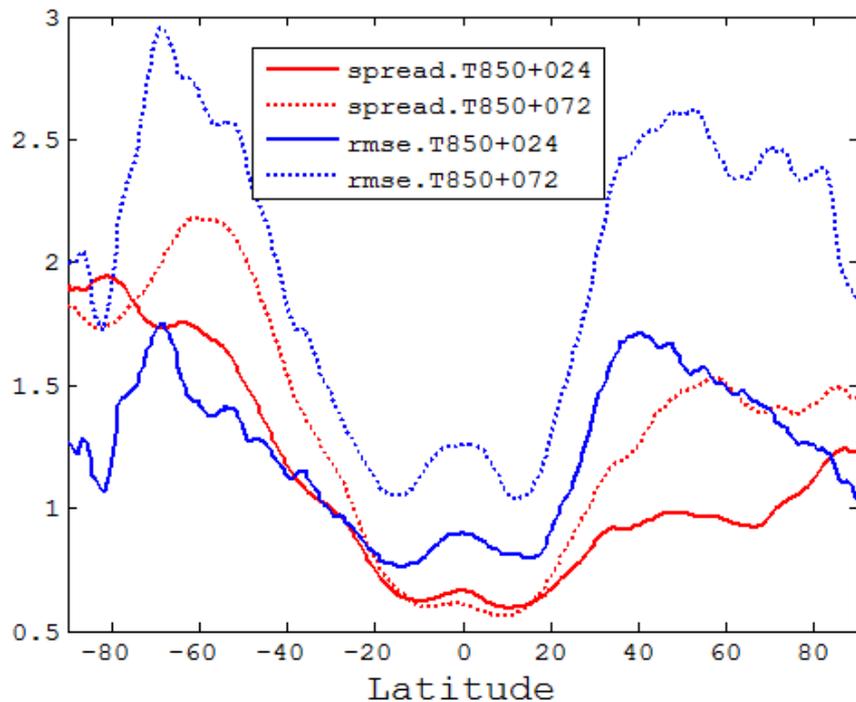
## Результаты численных экспериментов(2).

Показаны: разбросы ансамблей (красным) и RMSE (синим) H500 (слева), Ps (справа) для заблаговременности 24 часа (сплошные линии) и 72 часа (пунктирные линии) в зависимости от широты. Усреднение по прогнозам стартовавшим 01-31.12.2016 в 0 часов.



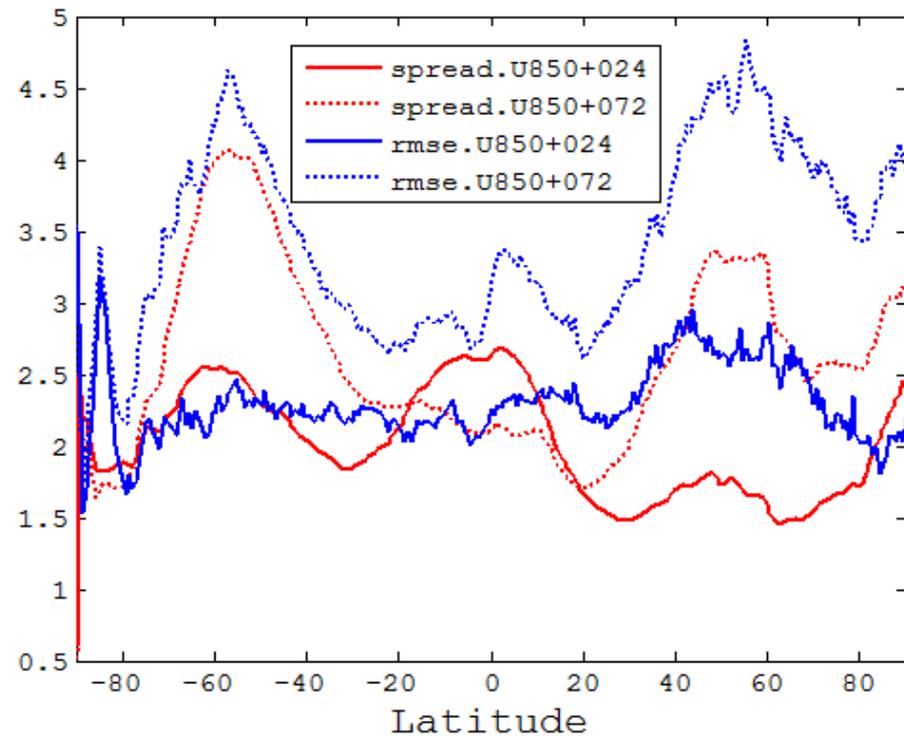
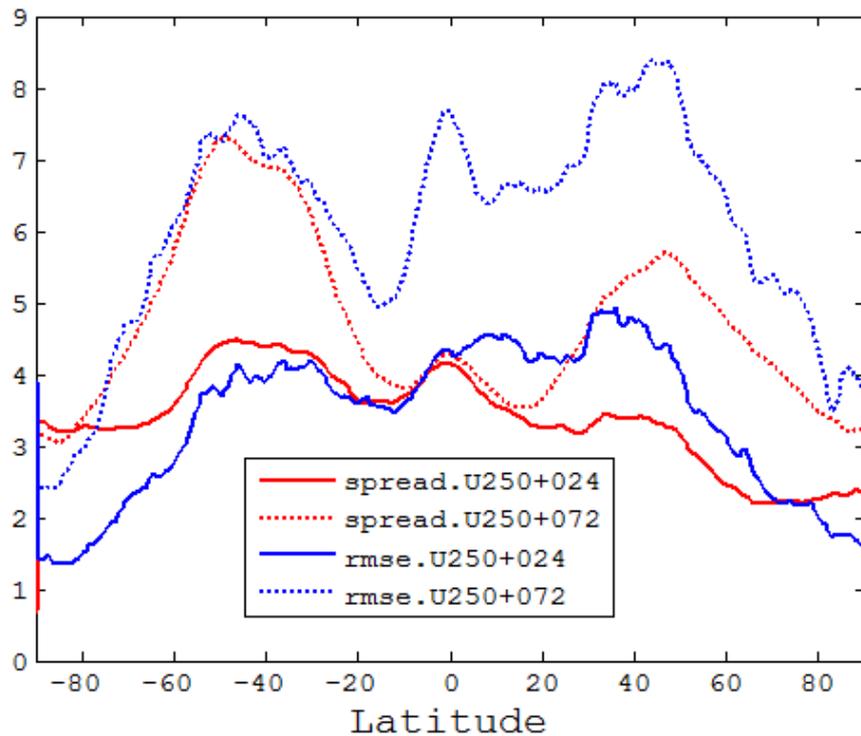
# Результаты численных экспериментов(3).

Показаны: разбросы ансамблей (красным) и RMSE (синим) T850 (слева), W850 (справа) для заблаговременности 24 часа (сплошные линии) и 72 часа (пунктирные линии) в зависимости от широты. Усреднение по прогнозам стартовавшим 01-31.12.2016 в 0 часов.



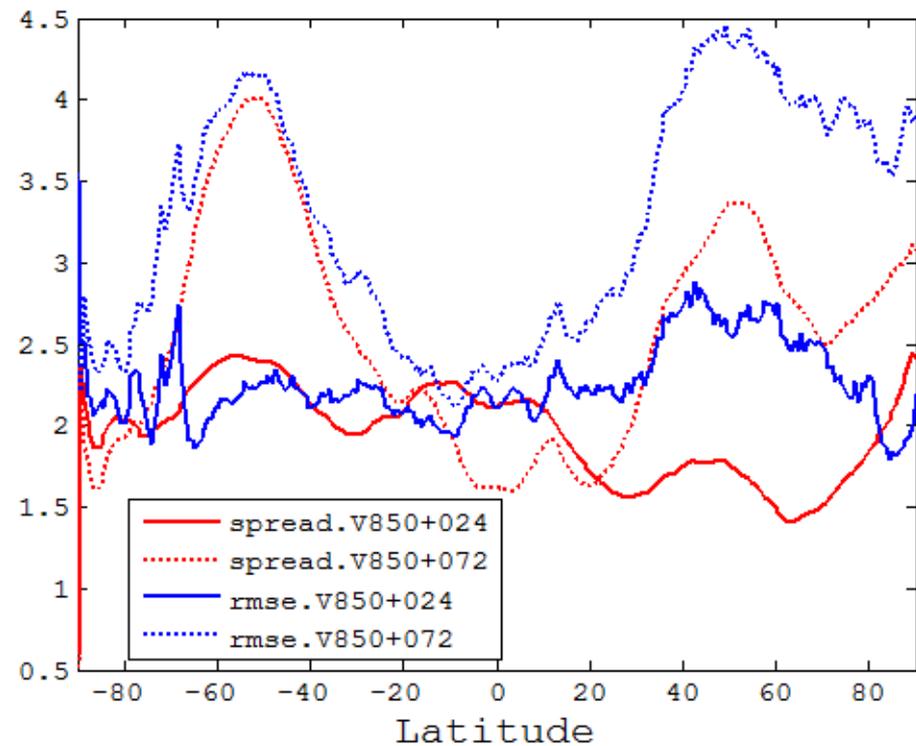
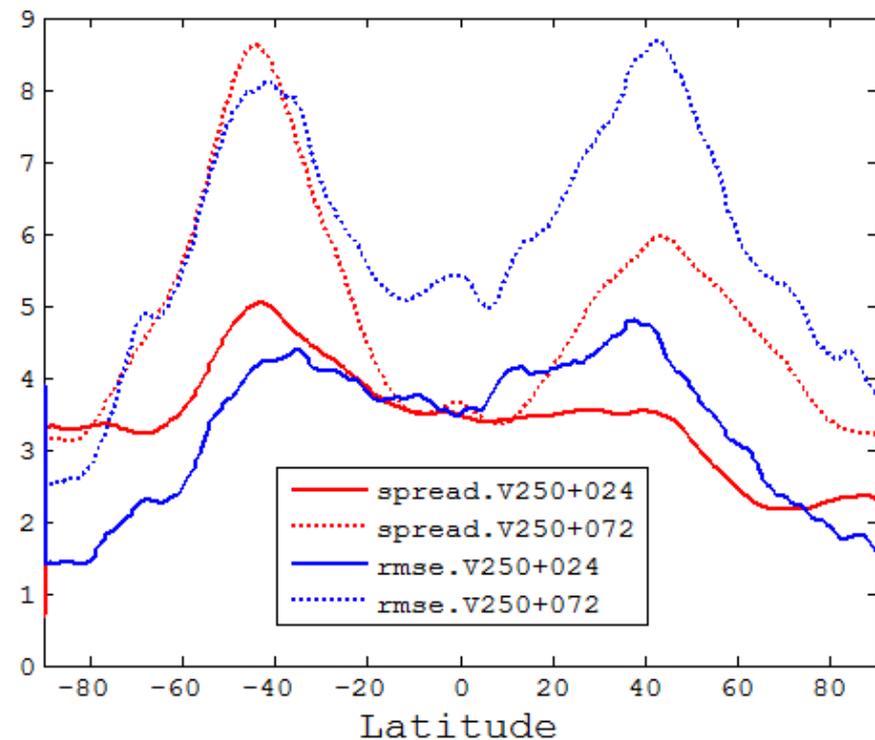
# Результаты численных экспериментов(4).

Показаны: разбросы ансамблей (красным) и RMSE (синим) U250 (слева), U850 (справа) для заблаговременности 24 часа (сплошные линии) и 72 часа (пунктирные линии) в зависимости от широты. Усреднение по прогнозам стартовавшим 01-31.12.2016 в 0 часов.



# Результаты численных экспериментов(5).

Показаны: разбросы ансамблей (красным) и RMSE (синим) V250 (слева), V850 (справа) для заблаговременности 24 часа (сплошные линии) и 72 часа (пунктирные линии) в зависимости от широты. Усреднение по прогнозам стартовавшим 01-31.12.2016 в 0 часов.



# Разбросы ансамбля прогнозов и RMSE среднего по ансамблю прогноза.

Оценки показателя Брайрера: 
$$BS = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^m (f_{ij} - E_{ij})^2$$

Где  $f_{ij}$  - вероятность события в ансамблевом прогнозе,  $E_{ij}$  - факт (0 если не произошло, или 1 если произошло),  $m$  – количество исходов (произведение числа модельных узлов с выбранной величиной на количество прогнозов).

BS случайного прогноза ( $f_{ij} = 0.5$ ) всегда равно 0.25, BS идеального прогноза равен 0.

В таблице 1 приведены BS прогнозов поля H500 в северном полушарии ( $20^\circ - 90^\circ$  с.ш.) с заблаговременностью от 1 до 5 суток для интервала  $x = x_c + \sigma$

	Заблаговременность прогноза, дней				
	1	2	3	4	5
LETKF+ПЛАН	0.029	0.046	0.066	0.087	0.114
ECMWF		0.02	0.03	0.04	0.06
JMA		0.03	0.04	0.06	0.08
RUMS		0.06	0.08	0.11	0.14

# Выводы:

- 1. Разбросы ансамблей растут медленнее, чем СКО с ростом заблаговременности прогноза. Необходимо использовать стохастическую параметризацию.
- 2. При первых запусках системы ансамблевого прогноза разница разбросов и СКО 24 часовых прогнозов в северном полушарии и тропиках невелика.
- 3. В южном полушарии разбросы ансамблей 24 часовых прогнозов заметно выше, чем СКО. Вероятно, необходимо добавление в систему усвоения дополнительных наблюдений.
- 4. Для полей U850, V850 в тропиках разбросы ансамблей заметно выше, а в северном полушарии заметно ниже, чем СКО 24 часовых прогнозов (возможно, завышены/занижены инфляции).

# Планы:

- 1) Подключение новой версии модели ПЛАВ (50 вертикальных уровней, гибридная вертикальная координата, усовершенствованы параметризации подсеточных процессов).
- 2) Учет времени наблюдений.
- 3) Контроль качества наблюдений в LETKF.
- 4) Стохастическая параметризация.

Спасибо за внимание.



# LETKF (Hunt, 2007).

## Фильтр Калмана:

$$J(x) = (x^b - x)^T (P^b)^{-1} (x^b - x) + (y^o - H(x))^T R^{-1} (y^o - H(x))$$

$$x^a = x^b + P^a (H^T R^{-1}) (y^o - H(x^b))$$

$$P^a = (I + P^b H^T R^{-1} H)^{-1} P^b$$

Здесь  $x^b$  – первое приближение,  $P^b$  – матрица ковариации ошибок  $x^b$ ;  
 $x^a$ ,  $P^a$  – анализ и матрица ковариации ошибок;  
 $y$ ,  $R$  – вектор наблюдений и матрица ковариации ошибок наблюдений.

В LETKF матрицы ковариаций аппроксимируются с помощью ансамблей.  
Средний анализ и ансамбль анализов ищем в виде линейной комбинации первых приближений.

# LETKF (Hunt, 2007).

$$J(x) = (x^b - x)^T (P^b)^{-1} (x^b - x) + (y^o - H(x))^T R^{-1} (y^o - H(x))$$

$X^b = [x_1^b - \bar{x}^b, \dots, x_K^b - \bar{x}^b]$  - Матрица ансамбля первого приближения

$X^a = [x_1^a - \bar{x}^a, \dots, x_K^a - \bar{x}^a]$  - Матрица ансамбль анализа

$$P^b = X^b (X^b)^T / (K - 1),$$

$$P^a = X^a (X^a)^T / (K - 1)$$

- матрицы ковариации ошибок

Ищем анализ в виде:  $\bar{x}_a = \bar{x}_b + X_b \bar{w}_a$ ,  $X_a = X_b W_a$  тогда

$$J(w) = (k - 1) w w^T + (y^o - y^b - Y^b w)^T R^{-1} (y^o - y^b - Y^b w)$$

(  $Y^b = H X^b$ ,  $y^b = H x^b$  )

Вычисления выполняются в пространстве ансамбля размерности  $K$ .

$$\begin{aligned} \text{Минимизируем } J(w) &\Rightarrow \bar{x}^a = \bar{x}^b + X^b \tilde{P}^a (H X^b)^T R^{-1} (y - H \bar{x}^b) \\ P^a = (I + P^b H^T R^{-1} H)^{-1} P^b &\Rightarrow \tilde{P}^a = [(k - 1) I + (H X^b)^T R^{-1} (H X^b)]^{-1} \\ &X^a = X^b [(k - 1) \tilde{P}^a]^{1/2} \end{aligned}$$