

УДК551.506.9

Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России

*М.Д. Цырульников¹, П.И. Свиренко¹, Д.Р. Гайфулин¹,
М.Е. Горбунов^{1,2}, А.Б. Успенский³*

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия;

*³Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета",
г. Москва, Россия*

В статье описывается система оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений Гидрометцентра России на основе трехмерного вариационного подхода (3D-Var). Кратко описывается использованная в ней и разработанная авторами модель трехмерных ковариаций полей ошибок первого приближения на основе трехмерных фильтров авторегрессии и скользящего среднего и ее многомасштабное обобщение, позволившее построить вычислительно эффективную схему анализа высокого пространственного разрешения. Основным направлением развития системы усвоения данных является включение ансамблевого прогноза для задания ковариаций ошибок первого приближения и внедрение вариационно-ансамблевой схемы анализа. Большое внимание уделяется эффективному усвоению спутниковых наблюдений, в том числе отечественных. Приводятся методика и результаты экспериментального усвоения данных наблюдений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ и инфракрасного гипер-спектрального Фурье-спектрометра ИКФС-2. Описывается новая методика обработки радиозатменных наблюдений, направленная на уменьшение смещений в нижней тропосфере, и приводятся полученные результаты.

Ключевые слова: усвоение данных, прогноз погоды, спутниковые наблюдения, ансамблевый прогноз

Development of the data assimilation scheme of the Hydrometcentre of Russia

*M.D. Tsyurulnikov¹, P.I. Svirenko¹, D.R. Gayfulin¹,
M.E. Gorbunov^{1,2}, A.B. Uspensky³*

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

³State Research Center "Planeta", Moscow, Russia

The operational 3D-Var based data assimilation scheme of the Hydrometcenter of Russia is described. The scheme employs a 3D background-error covariance model developed by the authors. The covariance model is based on 3D auto-regression

and moving-average filters. Here, its multi-scale extension is outlined, which allows a numerically efficient analysis scheme. The main direction of development of the data assimilation scheme is the inclusion of ensemble background-error covariances and implementation of an ensemble-variational scheme. Significant attention has been paid to efficient assimilation of satellite observations, including those produced by sensors deployed on Russian spacecraft. Techniques and results of the experimental assimilation of data from the microwave radiometer MTVZA-GY and the infrared hyper-spectral Fourier spectrometer IKFS-2 are presented. A new approach to processing of radio-occultation data aiming to reduce biases in the lower troposphere is outlined, and experimental results are given.

Keywords: data assimilation, weather forecast, satellite observations, ensemble forecast

Введение

Усвоение данных – базовая технология для многообразных научных и практических приложений в метеорологии и океанографии. Эта технология все шире применяется и в других науках о Земле и окружающей среде, таких как атмосферная химия, гидрология суши, геология, геомагнетизм, биогеохимия океана, экология и др. Задача усвоения данных в любой из этих сред – это формирование наиболее точной оценки текущего состояния среды (в нашем случае – атмосферы) на основе всех имеющихся (прошлых и текущих) наблюдений и с помощью ее математической (прогностической) модели. Главная цель усвоения данных в атмосфере – это формирование начальных данных необходимых для старта моделей прогноза погоды. Вторая цель – это мониторинг состояния атмосферы, включая вычисление т. н. реанализов для климатических исследований и практических применений в строительстве, на транспорте и т. п. Есть также ряд приложений, которые базируются на технологиях усвоения данных, например, выявление ожидаемого вклада планируемых к развертыванию наблюдательных систем, выяснение роли точности, временного и пространственного разрешения той или иной наблюдательной системы и т. п. (что позволяет оптимизировать расходы на новые и существующие системы наблюдений за атмосферой Земли и подстилающей поверхностью).

В Гидрометцентре России разработана и в течение ряда лет функционирует система многомасштабного усвоения данных, используемая оперативно в атмосфере на глобальном масштабе. Ядро атмосферной системы усвоения использовано также в оперативной системе усвоения данных в мировом океане [4].

В атмосфере усвоение данных реализовано по унифицированной методике, позволяющей работать как на глобальном, так и на региональном масштабе. Региональная версия схемы была разработана и протестирована в Сибирском регионе и в регионе Сочи (в связи с Олимпийскими играми в 2014 г., см. [19]). Базовая технология – т. н. трехмерное вариационное усвоение (3D-Var). Оригинальность методики усвоения состоит в новой схеме пространственных ковариаций на основе трехмерных

фильтров типа авторегрессии – скользящего среднего. Оперативно работают две глобальные схемы – статические анализы по первому приближению НСЭП и автономная (т. е. не использующая продукцию зарубежных прогностических центров) схема глобального циклического усвоения данных с использованием модели ПЛАВ [5].

1. Схема трехмерного вариационного анализа повышенного пространственного разрешения

Наша схема трехмерного вариационного усвоения 3D-Var (кратко описанная в [2, 7, 8]) основана на оригинальной модели трехмерной пространственной авторегрессии и скользящего среднего (ПАРСС):

$$\xi_k = \sum_{j=k-q(k)}^{k-1} F_{kj} \cdot \xi_j + U_k \alpha_k.$$

Здесь F , U – горизонтальные дискретные линейные операторы; α_k – возбуждающий белый шум; $q(k)$ – порядок (переменный) авторегрессии по вертикали; k, j – вертикальные уровни.

В матрично-векторном виде модель имеет вид:

$$S\xi = V\alpha.$$

Механическое повышение разрешения этой схемы анализа приводит к резкому росту времени вычислений (пропорционально 4-й степени шага сетки). Поэтому мы разработали новую схему, основанную на многосеточном методе, в котором длинноволновые компоненты трехмерного поля ошибок прогноза описываются на редкой сетке, тогда как на густой сетке представляются только коротковолновые компоненты (имеющие короткие пространственные корреляции). В результате для многомасштабной схемы рост времени счета становится пропорциональным не 4-й степени шага сетки, а 2-й степени шага сетки.

Многомасштабная схема ПАРСС имеет следующий вид. Мы вводим несколько (для простоты изложения, пусть два) масштаба и, соответственно, две сетки. Сетка 1 – разреженная, сетка 2 (последняя сетка в общем случае) совпадает с густой сеткой анализа. На каждой сетке определено свое поле ξ_i ($i = 1, 2$), так что мы определяем расширенную контрольную переменную (вектор) как $\xi^+ = (\xi_1, \xi_2)$. Далее, мы определяем оператор интерполяции L с редкой сетки на густую, так что искомое поле ошибки первого приближения есть

$$\xi = L\xi_1 + \xi_2.$$

Затем мы задаем свою модель ПАРСС для каждого масштаба:

$$S_i \xi_i = V_i \alpha_i.$$

Это может быть записано как

$$S^+ \zeta^+ = V^+ \alpha^+$$

для составных (блочных) матриц S^+ , V^+ . В результате мы пришли к модели ПАРСС для расширенной контрольной переменной, что позволяет применить уже имеющееся программное обеспечение для решения задачи анализа.

Результаты испытаний вышеописанной схемы в ее трехмасштабной реализации следующие. Мы проверили точность прогнозов, стартовавших с анализов низкого разрешения (1,5 град.) и высокого разрешения (0,5 град.) в конфигурации с первым приближением НСЕП за январь 2016 года. Типичные результаты представлены на рис. 1. Видно, что ошибки прогнозов для модели ПЛАВ низкого разрешения, эффект слабый, но положительный.

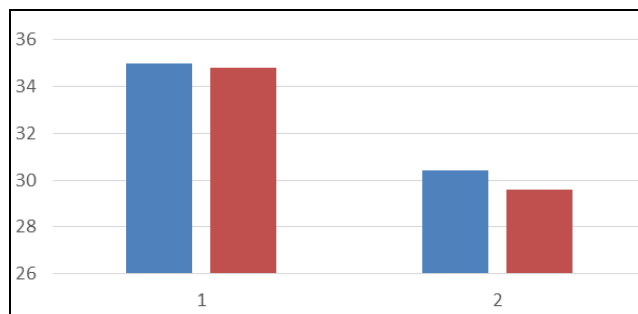


Рис. 1. Среднеквадратичные ошибки 3-суточных прогнозов геопотенциала поверхности 500 гПа (м): Слева – Северное полушарие, справа – Южное полушарие. Синим цветом – схема анализа низкого разрешения, красным цветом – схема анализа высокого разрешения.

Fig. 1. Root-mean-square errors of 72 h forecasts of geopotential at the 500 hPa surface (m). Left: Northern hemisphere. Right: Southern hemisphere. Blue: low-resolution analysis. Red: high-resolution analysis.

Таким образом, создана версия анализа 3D-Var с разрешением поля инкрементов анализа 0,5 град. (путем введения трехмасштабной схемы пространственных ковариаций). Новая схема экономична (относительно простого повышения размерности массивов), так как крупные масштабы, имеющие длинные корреляции, представляются на редкой сетке. Тем не менее новая схема требует в 10 раз больше памяти и времени счета, чем старая схема с разрешением поля инкрементов анализа 1,5 град.

2. Система ансамблевых анализов и прогнозов

Ошибки прогноза погоды проистекают из двух источников: неточность самой прогностической модели и ошибки в начальных данных, то есть ошибки анализа. При этом атмосфера является чрезвычайно сложной

динамической системой, и очень небольшое возмущение начальных данных может как сгладиться, так и привести к большой расходимости в ходе прогнозирования. При этом теоретически оценить влияние этого фактора не представляется возможным. Поэтому во всех ведущих мировых метеорологических центрах на сегодняшний день применяются системы ансамблевого прогнозирования.

Ключевая идея ансамблевого подхода состоит в следующем. Помимо детерминированного прогноза с невозмущенного анализа запускается ансамбль прогнозов с возмущенными начальными данными и возмущенными правыми частями прогностических уравнений, что учитывает неопределенность как начальных данных, так и прогностических уравнений (ошибки модели). Мы применяем схему генерации ансамблей при помощи аддитивного возмущения как первого приближения анализа (т. е. прогноза, что учитывает ошибки модели на предыдущем 6-часовом цикле усвоения), так и наблюдений.

Поскольку ошибки прогноза являются существенным образом пространственно коррелированными, для возмущения первого приближения анализа используется следующая схема. Во-первых, мы независимо возмущаем так называемые первичные некоррелированные между собой поля геопотенциала, несбалансированной функции тока, несбалансированного потенциала скорости и псевдо-относительной влажности. Во-вторых, мы применяем к полученным полям т. н. оператор баланса, отображающий их в интересующие нас метеорологические поля геопотенциала, температуры, векторного ветра и влажности. При генерации возмущений наблюдений их ошибки считаются некоррелированными.

Для оценки качества ансамбля были проведены численные эксперименты с системой циклического усвоения 3D-Vар с использованием прогностической модели ПЛАВ. Размер ансамбля составлял три члена из-за ограниченных вычислительных мощностей. Всего было сосчитано 160 циклов, что соответствует 40 дням (в сентябре-октябре 2014 г.). Ниже приведено сравнение ансамблевого разброса σ и стандартного отклонения ошибки прогноза e (в идеале должно быть $\sigma = e$).

На рис. 2 показан разброс ансамбля по зональному ветру и температуре в сравнении с ошибкой прогноза на высотах 550–850 гПа. Поскольку прогноз верифицируется по наблюдениям, содержащим ошибки, мы делим среднеквадратичную ошибку 6-часового прогноза на $\sqrt{2}$ (для приближенного учета ошибок наблюдений) и получаем скорректированную среднеквадратичную ошибку прогноза, с которой мы и сравниваем среднеквадратичный разброс. Из рис. 2 можно видеть отличное согласование ошибки прогноза и разброса ансамбля в районе экватора и заметно худшее – в районе полюсов. Аналогичная картина наблюдается и для других метеозлементов и высот в атмосфере. В дальнейшем схема генерации ансамбля будет настроена до получения более точного совпадения ошибки прогноза и ансамблевого разброса.

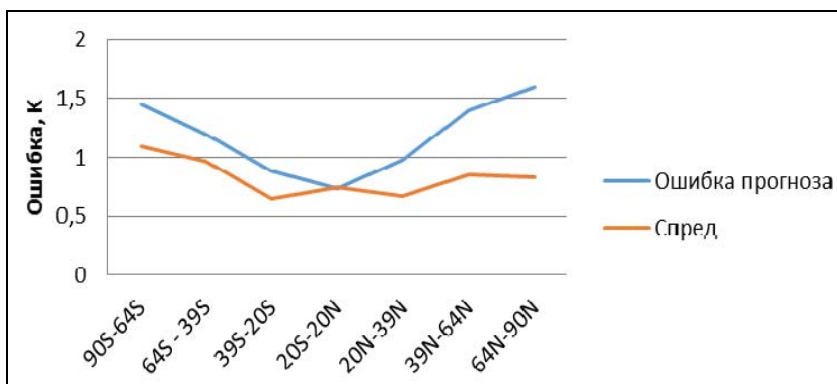


Рис. 2. Скорректированная среднеквадратичная ошибка прогноза и разброс (Спред) температуры (К) на высотах от 550 до 850 гПа.
Fig. 2. Corrected root-mean-square error and ensemble spread for temperature forecasts (K) in the layer 550-850 hPa.

Была также разработана схема использования ансамблевого разброса при формировании ковариаций ошибок первого приближения анализа (более подробно она будет описана в дальнейшем). Таким образом, создана система циклического ансамблевого усвоения на основе вариационного анализа, воспроизводящая неопределенности анализов и прогнозов. Система предназначена для инициализации (формирования начальных данных) ансамблевых прогнозов погоды.

3. Усвоение данных измерений спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ

Спутниковое зондирование атмосферы Земли является в настоящее время чрезвычайно важным источником информации для глобального численного прогноза погоды, соизмеримым или даже превосходящим по информативности традиционные контактные наблюдения. Для зондирования используют, в первую очередь, измерения уходящего излучения системы «подстилающая поверхность – атмосфера» в микроволновом и инфракрасном диапазонах спектра, чувствительные к вертикальным распределениям температуры и влажности в атмосфере. При этом, в отличие от инфракрасных, микроволновые измерения «всепогодны», а именно, слабо подвержены влиянию облаков, за исключением наиболее мощных с осадками.

3.1. Анализ точности данных измерений МТВЗА-ГЯ

Микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ установлен на борту спутника Метеор-М №2 [1, 6]. Его радиометрические каналы имеют рабочие частоты в окнах прозрачности атмосферы 10,6; 18,7; 23,8; 31,5; 36,7; 42;

48 и 91 ГГц (сканер), а также в линиях поглощения кислорода 52–57 ГГц (температурное зондирование) и водяного пара 183 ГГц (влажностное зондирование). Полоса обзора прибора составляет 1500 км, пространственное разрешение – 16–198 км (в зависимости от канала).

Мы разработали циклическую вариационную схему коррекции изменений радиометра МТВЗА-ГЯ, учитывающую зависимость смещения ошибки наблюдения антенной температуры от т. н. солнечных углов [11], т. е. от направления на солнце по отношению к ориентации спутника в пространстве. Исходные и скорректированные наблюдения затем были подвергнуты сравнению с яркостными температурами, вычисленными с помощью радиационной модели RTTOV по данным 6-часового прогноза НСЕП. Результаты (среднеквадратичные ошибки, К) представлены в таблице.

Таблица. Среднеквадратичные ошибки измерений в каналах атмосферного зондирования радиометра МТВЗА-ГЯ, К

Table. Root-mean-square observation errors in temperature sensitive channels of MTVZA-GY, K

Каналы	Температурные каналы						Влажностные каналы		
	15	16	17	18	19	20	27	28	29
Без коррекции	7.53	13.3	15.4	13.5	6.65	10.5	18.4	18.5	13.8
Коррекция [18]	0.67	0.83	1.70	0.62	0.71	0.79	2.00	2.15	2.65
Коррекция по солн. углам [11]	0.56	0.63	1.04	0.50	0.56	0.62	1.91	2.01	2.38

В таблице столбцы соответствуют каналам МТВЗА-ГЯ (в нумерации RTTOV с центральными частотами 52.8, 53.3, 53.8, 54.64, 57.6, 183.31±7.0, 183.31±3.0, 183.31±1.4 ГГц соответственно). 1-я строка показывает результаты без коррекции смещений (видны чрезвычайно большие ошибки – в основном за счет глобальных смещений). Во 2-й строке представлены результаты после схемы коррекции [18] (ошибки стали радикально меньше), а в 3-й строке – после применения разработанной нами схемы адаптивной коррекции с учетом солнечных углов [11] (ошибки стали еще меньше). Отметим, что применение процедуры абсолютной калибровки из [6] для перехода от антенных к яркостным температурам дает превышение среднеквадратичных ошибок измерений примерно на 0,05 К в температурных каналах по сравнению с результатами коррекции [18]. В сравнении с измерениями микроволновых радиометров AMSU-A и MHS, проанализированными за тот же период времени, ошибки в температурных и влажностных каналах МТВЗ-ГЯ оказались в среднем примерно в 1,5–2 раза больше, чем в аналогичных каналах AMSU-A и MHS.

3.2. Результаты усвоения данных измерений МТВЗА-ГЯ

Численные эксперименты по усвоению данных наблюдений МТВЗА-ГЯ в системе глобального усвоения данных Гидрометцентра России показали результаты, представленные на рис. 3 (подробнее см. [2]). В Северном полушарии эффект от внедрения наблюдений МТВЗА-ГЯ оказался нейтральным. В Южном полушарии эффект (в отсутствии наблюдений AMSU-A) оказался ощутимо положительным и составил примерно половину эффекта от усвоения данных AMSU-A. При наличии наблюдений AMSU-A эффект от МТВЗА-ГЯ в обоих полушариях был нейтральным.

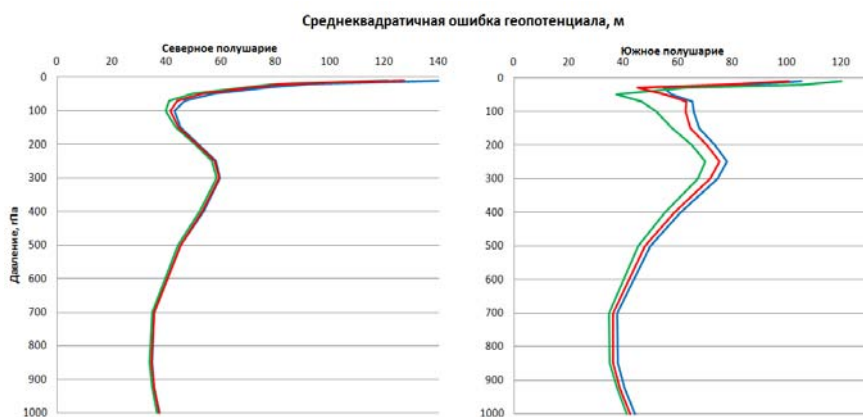


Рис. 3. Среднеквадратичная ошибка трехсуточного прогноза геопотенциала (м) по модели ПЛАВ. Синяя линия – без использования микроволновых измерений, красная – с усвоением данных МТВЗА-ГЯ, зеленая – с усвоением данных AMSU-A спутника Метоп-А.

Fig. 3. Root-mean-square errors of 72 h SL-AV forecasts of geopotential (m). Left: Northern hemisphere. Right: Southern hemisphere. Blue: without assimilation of satellite microwave data. Red: with assimilation of MTVZA-GY data. Green: with assimilation of AMSU-A data from Metop-A.

4. Усвоение данных измерений спутникового инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2

По сравнению с микроволновыми, инфракрасные измерения уходящего излучения системы «подстилающая поверхность – атмосфера» могут иметь существенно более высокие горизонтальное и вертикальное разрешение (последнее при достаточно высоком спектральном разрешении), но не являются «всепогодными» ввиду «непрозрачности» облаков.

Инфракрасный Фурье-спектрометр ИКФС-2, установленный на борту спутника Метеор-М №2 и спутника Метеор-М №2-2, имеет рабочий спектральный диапазон 5–15 мкм (2700 каналов), полосу обзора 1000–2500 км и пространственное разрешение в надире 35 км [1, 3]. Высокое

спектральное разрешение ($0,7\text{--}1,4\text{ см}^{-1}$) позволяет отнести ИКФС-2 к гиперспектральным ИК-зондировщикам.

4.1. Предварительный анализ точности данных измерений ИКФС-2

На рис.4 приведены оцененные нами (аналогично вышеизложенному для МТВЗА-ГЯ) смещения и стандартные отклонения для данных ИКФС-2 (слева) и IASI [8] (справа). Эти результаты получены осреднением по 4 суткам в сентябре 2018 г. Как данные ИКФС-2, так и данные IASI прошли коррекцию смещений подобно данным МТВЗА-ГЯ и фильтрацию облачности согласно [20]. Кроме того, для получения более сопоставимых результатов данные IASI, имеющие более высокое пространственное разрешение (12 км), были осреднены по четырем соседним т. н. пикселям – это уменьшило их эффективное горизонтальное разрешение до 48 км, что соизмеримо (и даже ниже) разрешающей способности ИКФС-2.

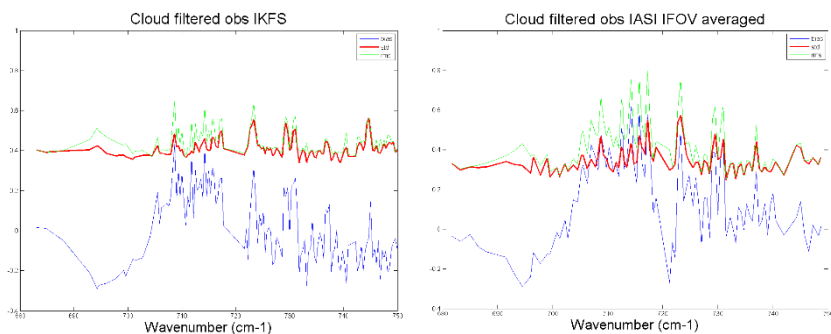


Рис. 4. Смещения (синие линии), стандартные отклонения (красные линии) и среднеквадратичные ошибки (зеленые линии) для данных ИКФС-2 (слева) и IASI (справа), ср. [3].

Fig. 4. Biases (blue), standard deviations (red), and root-mean-square errors (green) for IKFS-2 data (left) and IASI data (right), cf. [3].

Видно, что точность данных ИКФС-2 практически не уступает таковой для IASI (считающегося «эталонным» инструментом в своем классе).

4.2 Результаты усвоения данных измерений ИКФС-2

Были проведены первые численные эксперименты (аналогичные вышеприведенным для МТВЗА-ГЯ) по усвоению в системе усвоения данных Гидрометцентра России данных измерений ИКФС-2. Результаты усвоения данных в 20 частотных каналах, равномерно выбранных в диапазоне $670\text{--}750\text{ см}^{-1}$ (15 мкм полоса поглощения углекислого газа) и чувствительных, преимущественно, к температуре воздуха в тропосфере, показаны на рис. 5. При этом из других данных спутникового зондирования

усваивались только оценки векторов ветра (AMV) и профили коэффициента преломления воздуха (REFR) по данным радиозатменных наблюдений COSMIC и GRAS (см. [2] и ссылки там). Видно ощутимое повышение точности прогнозов в результате усвоения данных ИКФС-2 в Южном полушарии. В Северном полушарии эффект был также в целом положительный, но значительно меньший по величине.

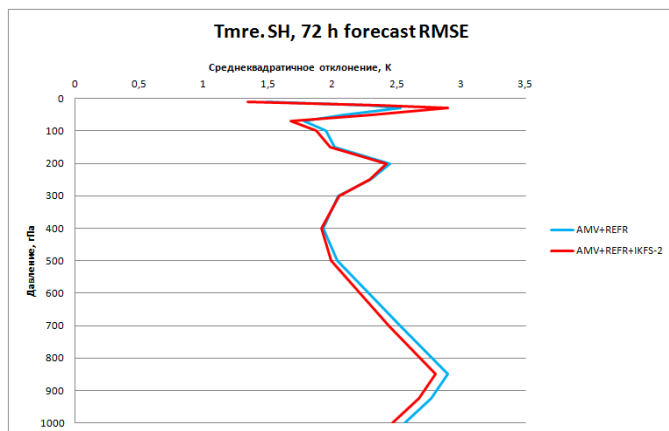


Рис. 5. Среднеквадратичная ошибка трехсуточного прогноза температуры (К) в Южном полушарии. Синяя линия – без использования данных ИКФС-2, красная линия – с использованием данных ИКФС-2.

Fig. 5. Root-mean-square error of 72 h forecast of temperature (K) in the Southern hemisphere. Blue: without assimilation of IKFS-2 data. Red: with assimilation of IKFS-2 data.

5. Развитие методов обработки радиозатменных наблюдений

Радиозатменное зондирование основано на восстановлении метеопараметров атмосферы по измерениям волнового поля, излучаемого спутниками системы GPS и принимаемого на низкоорбитальном спутнике. Обработка радиозатменных данных использует методы радиолографии, поскольку в измерениях помимо амплитуды доступна также фаза [12, 13, 15]. Измеряемое волновое поле можно записать в следующем виде:

$$u(t) = A(t) \exp(ik(S_0(t) + \Delta S(t))),$$

где $A(t)$ – амплитуда поля; $S_0(t)$ – расстояние между излучающим и принимающим спутником; $\Delta S(t)$ – атмосферная фазовая задержка; k – волновое число. Идея метода канонических преобразований состоит в том, что волновое поле преобразуется в представление прицельной высоты луча p . Для этого используется интегральный оператор Фурье следующего вида [15]:

$$\hat{\Phi}_2 u(p) = \sqrt{\frac{k}{2\pi}} a(p) \int A(Y) \exp\left(ikS^{(M)}(Y) - ikpY\right) dY,$$

где $Y = Y(t)$ – новая координата, связанная со временем; $a(p)$ – амплитудная функция оператора; $S^{(M)}(Y)$ – гладкая модель измеряемой фазы, вычисляемая на основе климатологической модели атмосферы. Преобразованное поле $\hat{\Phi}_2 u(p)$ можно представить следующим образом:

$$\hat{\Phi}_2 u(p) = A'(p) \exp(i\varphi'(p)),$$

где $A'(p)$ амплитуда преобразованного поля; $\varphi'(p)$ – его фаза. Смысл данного преобразования состоит в том, что поле, измеряемое в многолучевых областях, преобразуется в однолучевое представление. Это позволяет определять угол рефракции геометрическими методами.

Приведенному выше оператору соответствует следующее каноническое преобразование [15]:

$$\begin{aligned} p &= f(Y) + \eta, \\ \xi &= -Y, \end{aligned}$$

где η – производная эйконала (или импульс) измеренного поля $u(t)$, а ξ – импульс преобразованного поля, связанный с углом рефракции алгебраическими соотношениями.

Представление, реализуемое данным преобразованием, не всегда оказывается однолучевым, поскольку прицельная высота является инвариантом луча лишь в сферически-слоистой среде [15]. Мы будем рассматривать обобщенное представление с новой координатой:

$$p' = p + \beta Y,$$

где β – настраиваемый параметр с размерностью км/рад. Обобщенное преобразование будет записано в следующем виде:

$$\begin{aligned} p' &= f(Y) + \beta Y + \eta \equiv f'(Y) + \eta, \\ \xi &= -Y. \end{aligned}$$

Данному преобразованию соответствует модифицированный оператор $\hat{\Phi}_2^{(\beta)} u(p)$, который при $\beta = 0$ сводится к исходному оператору $\hat{\Phi}_2 u(p)$.

На рис. 6 приводятся результаты статистического сравнения обработки радиозатменных данных с данными анализов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (обработано около 1000 профилей). Модифицированный алгоритм приводит к заметному уменьшению систематических отклонений в интервале высот до 1 км. В средних широтах и в статистике для всего мира также уменьшается среднеквадратичное

отклонение. При этом распределение количества данных, прошедших контроль качества, по высотам становится более равномерным, и в указанном интервале высот существенно увеличивается количество данных. Это связано с выбором другой проекции лучевого многообразия, позволяющей лучше разрешить структуры в нижней тропосфере. В дальнейшем будет исследован выбор оптимального параметра β в зависимости от широты.

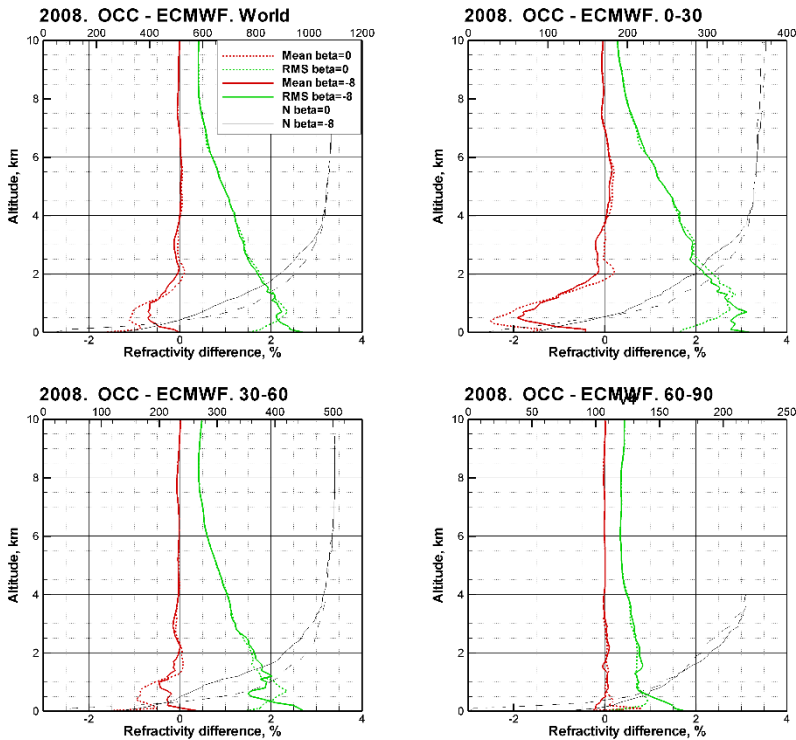


Рис. 6. Результаты статистического сравнения показателя преломления, восстановленного по данным эксперимента COSMIC, с данными анализов ECMWF для 01.01.2008. Слева сверху – для всего мира, справа сверху (0–30) – тропические широты. Снизу слева (30–60) – средние широты. Справа снизу (60–90) – полярные широты. В алгоритме использованы значения параметра $\beta=0$ (пунктир) и $\beta=-8$ (сплошные линии). Приведены профили среднего отклонения (красный, нижняя горизонтальная ось), среднеквадратичного отклонения (зеленый, нижняя горизонтальная ось) и количества данных (черный, верхняя горизонтальная ось).

Fig. 6. Results of the statistical comparison of the refractivity index (retrieved from COSMIC data) with ECMWF analyses for 01.01.2008. Upper left: whole world. Upper right (0–30): tropics. Lower left (30–60): mid-latitudes. Lower right (60–90): polar latitudes. Dotted lines: $\beta=0$. Solid lines: $\beta=-8$. The biases are in red (the lower horizontal axis). The root-mean-square differences are in green (the lower horizontal axis). The number of data is in black (the upper horizontal axis).

Заключение

Описано развитие за последние годы системы оперативного глобального усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России. Разработана и внедрена многомасштабная модель пространственных ковариаций на основе трехмерных фильтров авторегрессии и скользящего среднего. Разработана система генерации ансамблевых прогнозов на основе системы усвоения данных с вариационным анализом. Созданы метод и схема коррекции данных отечественных микроволновых спутниковых наблюдений МТВЗА-ГЯ. Реализована интеграция в схему усвоения данных и экспериментальное усвоение данных наблюдений МТВЗА-ГЯ, а также отечественных инфракрасных гипер-спектральных наблюдений ИКФС-2. Разработан новый подход к более эффективной обработке радиозатменных наблюдений, уменьшающий их смещения в нижней тропосфере.

Дальнейшее развитие систем глобального и регионального усвоения данных в Гидрометцентре России будет основано на гибридном подходе к усвоению данных с использованием подходов, развитых нами в [22, 23]. При формировании ансамбля прогнозов будут моделироваться ошибки прогностической модели с использованием разработанного нами метода генерации пространственно-временных псевдослучайных полей [21]. При усвоении данных спутникового зондирования планируется учитывать коррелированность их ошибок [17].

Дальнейшая работа по усвоению данных ИКФС-2 будет вестись по следующим направлениям: коррекция смещений в зависимости от угла наблюдения (позиции в строке сканирования), выбор наиболее информативных частотных каналов (см. [10]), более точный учет облачности и подстилающей поверхности, задание дисперсий и, возможно, корреляций ошибок наблюдения в схеме усвоения данных и др. Помимо этого, успешный запуск в июле 2019г. на послеполуденную орбиту спутника Метеор-М №2-2 с аппаратурой ИКФС-2 на борту (спутник Метеор-М №2 функционирует на утренней орбите) позволит удвоить количество усваиваемых наблюдений ИКФС-2, что должно дать заметный эффект в прогнозе. Продолжается работа по усовершенствованию алгоритмов обработки радиозатменных данных. С этой целью разработан и протестирован обобщенный вариант метода канонических преобразований. Его внедрение позволит сократить систематическую и случайную ошибки наблюдений в нижней тропосфере.

Список литературы

1. Асмус В.В., Загребав В.А., Макриденко Л.А. и др. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 5–16.
2. Гайфулин Д.Р., Цырульников М.Д., Успенский А.Б., Крамчанинова Е.К., Успенский С.А., Свиренко П.И., Горбунов М.Е. Использование информации спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в системе усвоения данных Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 36–47.
3. Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Козлов Д.А., Козлов И.А., Монахов Д.О., Никулин А.Г., Успенский А.Б., Рублев А.Н., Кухарский А.В. Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: результаты эксплуатации на борту метеоспутника “Метеор-М” № 2 // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 88–100.

4. Зеленько А.А., Вильфанд Р.М., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цырульников М.Д., Свиренко П.И. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей мирового океана // Известия РАН. ФАО. 2016. Том 52, № 4. С. 501–513.

5. Толстых М.А., Желен Ж.-Ф., Володин Е.М. и др. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 25–35.

6. Успенский А.Б., Асмус В.В., Козлов А.А. и др. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 5. С. 57–70.

7. Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Горин В.Е., Горбунов М.Е., Ордин А.Л., Багров А.Н. Новая технология объективного анализа на основе схемы 3D-VAR // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2012. Информационный Сборник № 39. С. 6–14. <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb39/tsyru.pdf>.

8. 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 // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2016. Информационный Сборник № 43. С. 3–12. <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb43/cirul.pdf>.

9. Blumstein D., Chalon G., Carlier T., Christian Buil, Hebert P., Maciaszek T., Ponce G. et al. IASI instrument: Technical overview and measured performances // Proceedings SPIE Conference, Denver. 2004. Vol. 5543. P. 196–207. DOI: 10.1117/12.560907. Vol. 5543. P. 196–207.

10. Collard A.D. Selection of IASI channels for use in numerical weather prediction // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2007. Vol. 133. P. 1977–1991.

11. Gayfulin D., Tsyrunikov M., Uspensky A. Assessment and Adaptive Correction of Observations in Atmospheric Sounding Channels of the Satellite Microwave Radiometer MTVZA-GY // Pure Appl. Geophys. 2018. Vol. 175, no. 10. P. 3653–3670.

12. Gorbunov M.E., Gurvich A.S. Microlab-1 experiment: multipath effects in the lower troposphere // J. Geoph. Res. Atmospheres. 1998. Vol. 103, no. D12. P. 13.819–13.826.

13. Gorbunov M.E., Kornbluh L. Analysis and validation of Challenging Minisatellite Payload (CHAMP) radio occultation data // J. Geoph. Res. 2003. Vol. 108. no. D18. P. 4584.

14. Gorbunov M.E. Canonical transform method for processing GPS radio occultation data in lower troposphere // Radio Science. 2002. Vol. 37, no. 5. P. 9.1–9.10.

15. Gorbunov M.E., Lauritsen K.B. Analysis of wave fields by Fourier Integral Operators and its application for radio occultations // Radio Science. 2004. Vol. 39, no. 4. RS4010.

16. Gorbunov M.E., Lauritsen K.B. Error Estimate of Bending Angles in the Presence of Strong Horizontal Gradients // 3rd International Workshop on Occultations for Probing Atmosphere and Climate (OPAC3), Graz, Austria, 17–21 September 2007.

17. Gorin V.E., Tsyrunikov M.D. Estimation of multivariate observation-error statistics for AMSU-A data // Mon. Wea. Rev. 2011. Vol. 139, no. 12. P. 3765–3780.

18. Harris B.A., Kelly G. A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2002. Vol. 127, no. 574. P. 1453–1468.

19. Kiktev D.P., Joe G.A., Isaac A., Montani I.-L., Frogner P., Nurmi B., Bica J., Milbrandt M., Tsyrunikov E., Astakhova A., Bundel S., Belair M., Pyle A., Muravyev G., Rivin I., Rozinkina T., Paccagnella Y., Wang J., Reid T., Nipen K.-D. Ahn. FROST-2014: the Sochi Winter Olympics International Project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2017. Vol. 98, no. 9. P. 1908–1929.

20. McNally A.P., Watts P.D. A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2003. Vol. 129, no. 595. P. 3411–3423.

21. Tsyrunikov M., Gayfulin D. A limited-area spatio-temporal stochastic pattern generator for simulation of uncertainties in ensemble applications // Meteorol. Zeitschrift. 2017. Vol. 26, no. 5. P. 549–566.

22. Tsyrunikov M., Rakiiko A. A Hierarchical Bayes ensemble Kalman Filter // Physica D (Nonlinear Phenomena). 2017. Vol. 338. P. 1–16.

23. Tsyrunikov M., Rakiiko A. Impact of non-stationarity on hybrid ensemble filters: A study with a doubly stochastic advection-diffusion-decay model // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2019. Vol. 145, no. 722. P. 2255–2271.

References

1. Asmus V. V., Zagrebaev V. A., Makridenko L. A., Milekhin O. E., Solov'ev V. I., Uspenskii A. B., Frolov A. V., Khailov M. N. Meteorological satellites based on Meteor-M polar orbiting platform. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 12, pp. 787–794. DOI: 10.3103/S1068373914120012.

2. Gayfulin D. R., Tsyrunikov M. D., Uspensky A. B., Kramchaninova E. K., Uspensky S. A., Svirenko P. I., Gorbunov M. E. The usage of MTVZA-GYa satellite microwave radiometer observations in the data assimilation system of the Hydrometcenter of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 9, pp. 564–573. DOI: 10.3103/S1068373917090035.

3. Golovin Yu. M., Zavelevich F.S., Kozlov D.A., Kozlov I.A., Monakhov D.O., Nikulin A.G., Uspensky A.B., Rublev A.N., Kukharsky A.V. Infrared Fourier-Transform Spectrometer IKFS-2 Operating Onboard "Meteor-M" №2 Satellite. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Observation and Remote Sensing]*, 2017, no. 4, pp. 88-100 [in Russ.].
4. Zelenko A.A., Vil'fand R.M., Resnyanskii Y.D., Strukov B.S., Tsyruльников M.D., Svirenko P.I. An ocean data assimilation system and reanalysis of the world ocean hydrophysical fields. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 443-454. DOI: 10.1134/S0001433816040149
5. Tolstykh M.A., Volodin E.M., Kostrykin S.V., Fadeev R.Y., Shashkin V.V., Bogoslovskii N.N., Vil'fand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Mityak V.G., Shlyayeva A.V., Geleyn J.F., Ezau I.N., Yurova A.Y. Development of the multiscale version of the SL-AV Global Atmosphere Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, no. 6, pp. 25-35. DOI: 10.3103/S1068373915060035
6. Uspenskiy A.B., Asmus V.V., Kozlov A.A. i dr. Absolyutnaya kalibrovka kanalov atmosfernogo zondirovaniya sputnikovogo mikrovolnovogo radiometra MTVZA-GYA. *Issledovanie Zemli izkosmosa [Earth Observation and Remote Sensing]*, 2016, no. 5, pp. 57-70 [in Russ.].
7. Tsyruльников M. D., Svirenko P.I., Gorin V.E., Gorbunov M.E., Ordin A.L., Bagrov A.N. Novaya tekhnologiya ob"ektivnogo analiza na osnove skhemy 3D-VAR. Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. *Informatsionnyy Sbornik*, 2012, vol. 39, pp. 6-14 [in Russ.]. Available at: <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb39/tsyru.pdf>.
8. Tsyruльников M. D., Svirenko P.I., Gayfulin D.R., Gorbunov M.E., Bagrov A.N. Novaya tekhnologiya tsiklicheskogo usvoeniya dannykh na osnove skhemy analiza 3D-VAR. Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. *Informatsionnyy Sbornik*, 2016, vol. 43, pp. 3-12 [in Russ.]. Available at: <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb43/cirul.pdf>.
9. Blumstein D., Chalou G., Carlier T., Christian Buil, Hebert P., Maciaszek T., Ponce G. et al. IASI instrument: Technical overview and measured performances. *Proceedings SPIE Conference, Denver, 2004*, vol. 5543, pp. 196-207. DOI: 10.1117/12.560907.
10. Collard A.D. Selection of IASI channels for use in numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2007, vol. 133, pp. 1977-1991.
11. Gayfulin D., Tsyruльников M., Uspenskiy A. Assessment and Adaptive Correction of Observations in Atmospheric Sounding Channels of the Satellite Microwave Radiometer MTVZA-GY. *Pure Appl. Geophys.*, 2018, vol. 175, no. 10, pp. 3653-3670.
12. Gorbunov M.E., Gurvich A.S. Microlab-1 experiment: multipath effects in the lower troposphere. *J. Geoph. Res. Atmospheres*, 1998, vol. 103, no. D12, pp. 13.819-13.826.
13. Gorbunov M.E., Kornbluh L. Analysis and validation of Challenging Minisatellite Payload (CHAMP) radio occultation data. *J. Geoph. Res.*, 2003, vol. 108, no. D18, p. 4584.
14. Gorbunov M.E. Canonical transform method for processing GPS radio occultation data in lower troposphere. *Radio Science*, 2002, vol. 37, no. 5, pp. 9.1-9.10.
15. Gorbunov M.E., Lauritsen K.B. Analysis of wave fields by Fourier Integral Operators and its application for radio occultations. *Radio Science*, 2004, vol. 39, no. 4, p. RS4010.
16. Gorbunov M.E., Lauritsen K.B. Error Estimate of Bending Angles in the Presence of Strong Horizontal Gradients. 3rd International Workshop on Occultations for Probing Atmosphere and Climate (OPAC3), Graz, Austria, 17-21 September 2007.
17. Gorin V.E., Tsyruльников M.D. Estimation of multivariate observation-error statistics for AMSU-A data. *Mon. Wea. Rev.*, 2011, vol. 139, no. 12, pp. 3765-3780.
18. Harris B.A., Kelly G. A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2002, vol. 127, no. 574, pp. 1453-1468.
19. Kiktev D.P., Joe G.A., Isaac A., Montani I.-L., Frogner P., Nurmi B., Bica J., Milbrandt M., Tsyruльников E., Astakhova A., Bundel S., Belair M., Pyle A., Muravyev G., Rivin I., Rozinkina T., Paccagnella Y., Wang J., Reid T., Nipen K.-D. Ahn. FROST-2014: the Sochi Winter Olympics International Project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 98, no. 9, pp. 1908-1929.
20. McNally A.P., Watts P.D. A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2003, vol. 129, no. 595, pp. 3411-3423.
21. Tsyruльников M., Gayfulin D. A limited-area spatio-temporal stochastic pattern generator for simulation of uncertainties in ensemble applications. *Meteorol. Zeitschrift*, 2017, vol. 26, no. 5, pp. 549-566.
22. Tsyruльников M., Rakitko A. A Hierarchical Bayes ensemble Kalman Filter. *Physica D (Nonlinear Phenomena)*, 2017, vol. 338, pp. 1-16.
23. Tsyruльников M., Rakitko A. Impact of non-stationarity on hybrid ensemble filters: A study with a doubly stochastic advection-diffusion-decay model. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2019, vol. 145, no. 722, pp. 2255-2271.

Поступила в редакцию 09.10.2019 г.

Received by the editor 09.10.2019.