

## Усвоение данных спутниковых метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России

М. Д. Цырульников\*, Д. Р. Гайфулин\*,  
П. И. Свиренко\*, А. Б. Успенский\*\*

*Представлены результаты работ по анализу, коррекции и усвоению данных спутниковых микроволновых и инфракрасных наблюдений в системе глобального усвоения данных Гидрометцентра России. Приведены методика и результаты адаптивной коррекции (внешней калибровки) каналов атмосферного зондирования и сканерных каналов микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, устанавливаемого на полярно-орбитальные спутники серии "Метеор-М". Описана методика усвоения данных гиперспектрального инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2, также входящего в состав полезной нагрузки спутников "Метеор-М". Методика включает новую схему выбора наиболее информативных каналов на основе ортогонализации якобианов. Сравнение результатов усвоения данных ИКФС-2 и данных европейского интерферометра IASI показывает примерно одинаковое положительное влияние на краткосрочный прогноз погоды.*

**Ключевые слова:** усвоение данных, микроволновые спутниковые наблюдения, инфракрасные спутниковые наблюдения.

**DOI:** 10.52002/0130-2906-2021-12-80-93

### 1. Введение

Спутниковые наблюдения за состоянием земной атмосферы и подстилающей поверхностью являются ключевым компонентом глобальной метеорологической наблюдательной системы. По вкладу в качество численного прогноза погоды спутниковые наблюдения доминируют в Южном полушарии и соизмеримы с традиционными контактными наблюдениями (наземными станциями, кораблями и буями, радиозондами, самолетными наблюдениями) в Северном полушарии (см., например, [17], рис. 3), причем наиболее информативными являются измерения уходящего излучения системы "Земля — атмосфера" в микроволновом и инфракрасном диапазонах спектра (чувствительные к температуре и влажности в атмосфере) с помощью атмосферных зондировщиков.

Достоинство микроволновых наблюдений в том, что облака (за исключением наиболее мощных облаков и облаков с осадками) прозрачны для

\* Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации; e-mail: mik.tsyrulnikov@gmail.com (Цырульников Михаил Давыдович).

\*\* Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета".

измерений в каналах температурного атмосферного зондирования и полупрозрачны в каналах влажностного зондирования. Прозрачность облачности позволяет “видеть сквозь облако”, а полупрозрачность — “заглянуть внутрь облака”. Высокая информативность так называемых гиперспектральных инфракрасных наблюдений (в отсутствие облачности в поле зрения прибора) обусловлена значительно большим по сравнению с микроволновыми наблюдениями числом частотных каналов, а также более высоким горизонтальным и вертикальным разрешением.

Важную роль в современной глобальной системе метеорологических наблюдений играют спутниковые наблюдения ветра по движению облаков и полям влажности (AMV — Atmospheric Motion Vectors [15]), а также скаттерометрические наблюдения приводного ветра [23]. Однако эти наблюдения преимущественно одноуровневые, что ограничивает их вклад в прогноз погоды. Большой потенциал имеют спутниковые лидарные наблюдения (см., например, работу [24]), позволяющие оценить составляющую ветра вдоль луча лидара на ряде уровней в атмосфере.

Другим важным компонентом глобальной системы наблюдений за земной атмосферой являются радиозатменные наблюдения (также известные как радиопросвечивание), которые измеряют задержку распространения радиосигнала спутниковых навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС и других) в атмосфере Земли при приеме радионавигационного сигнала на низкоорбитальном спутнике (см., например, работу [12]). Задержка радиосигнала определяется пространственным распределением показателя преломления воздуха, зависящего в свою очередь от атмосферных полей температуры и влажности, — вследствие этого появляется возможность уточнить температуру и влажность атмосферы.

Спутниковые и другие наблюдения используют при численном прогнозе погоды с применением технологии усвоения данных (см., например, работу [7]). Кратко охарактеризуем оперативную систему усвоения спутниковых данных в Гидрометцентре России и представим результаты исследований и разработок, направленных на повышение эффективности использования спутниковых наблюдений.

## 2. Система усвоения данных

В Гидрометцентре России с 2016 г. работает в оперативном режиме глобальная система усвоения данных метеорологических (в том числе спутниковых) наблюдений [5], основанная на методе трехмерного вариационного усвоения (3D-Var) и использующая прогностическую атмосферную модель ПЛАВ [3]. Система отличается от других систем вариационного усвоения моделью многоэлементных пространственных ковариаций полей ошибок первого приближения (6-часового прогноза). Модель ковариаций основана на трехмерных формирующих фильтрах и позволяет задавать изменчивую в пространстве структуру полей ошибок первого приближения [1, 6]. В оперативной версии системы усвоения структура ковариаций статическая и зависит только от широты. Ведутся работы по использованию ансамблевой статистики для динамической оценки изменчивых в пространстве и времени параметров модели ковариаций в ансамблево-вариационной схеме анализа.

Система усваивает данные традиционного набора контактных наблюдений — синоптических наблюдений приземных полей давления, температуры, ветра, влажности, радиозондовых наблюдений температуры, ветра и влажности, а также самолетных наблюдений температуры и ветра. Наряду с результатами контактных наблюдений, система усваивает данные измерений спутниковых атмосферных зондировщиков микроволнового и инфракрасного диапазонов спектра, радиозатменных наблюдений, а также продукты дистанционного зондирования — оценки векторов ветра по движению облаков и полям влажности, а также векторов приводного ветра по данным скаттерометрических наблюдений. Ниже рассмотрены методические аспекты разработанных технологий обработки и усвоения данных спутниковых радиационных (микроволновых и инфракрасных) наблюдений.

### 3. Микроволновые наблюдения

В глобальной системе усвоения данных Гидрометцентра России оперативно усваиваются данные наблюдений микроволновых радиометров AMSU-A и MHS со спутников “Метеор” и “NOAA”, а также разработана технология усвоения данных наблюдений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, устанавливаемого на спутниках серии “Метеор-М”. Радиометр МТВЗА-ГЯ имеет 29 каналов, среди них 16 “сканерных” каналов в окнах прозрачности атмосферы, а также 13 “атмосферных” каналов (10 каналов температурного зондирования и 3 канала влажностного зондирования). Ширина полосы обзора составляет 1500 км, горизонтальное разрешение — 16—198 км (в зависимости от канала). Геометрия сканирования — круговая коническая. Дополнительные детали описания МТВЗА-ГЯ можно найти, например, в работах [4, 10].

В работе [1] приведены результаты усвоения данных наблюдений в “температурных” каналах 15—20 МТВЗА-ГЯ (со спутника “Метеор-М” № 2) в сравнении с усвоением наблюдений в температурных каналах 5—10 радиометра AMSU-A. Здесь и далее использована нумерация каналов МТВЗА-ГЯ, принятая в модели RTTOV [10]. Показано, что использование данных МТВЗА-ГЯ приводит к заметному уменьшению ошибки трехсуточного прогноза по модели ПЛАВ в Южном полушарии. При этом эффект от усвоения данных МТВЗА-ГЯ составляет примерно половину от эффекта от усвоения данных AMSU-A. В Северном полушарии эффект от усвоения данных МТВЗА-ГЯ был нейтральным [1].

#### 3.1. Система внешней калибровки (коррекции ошибок) каналов температурного зондирования МТВЗА-ГЯ с использованием солнечных углов в качестве предикторов

Эксплуатация МТВЗА-ГЯ на борту спутников “Метеор-М” № 2 (июль 2014 г. — август 2017 г.) и № 2-2 (с июля 2019 г. по настоящее время) выявила необходимость внешней калибровки — коррекции измеряемых антенных температур  $T^a$ , получаемых после бортовой радиометрической калибровки, при переходе к яркостным температурам  $T^b$ . Вследствие влияния различных мешающих факторов величины  $T^a$  могут достаточно силь-

но отличаться от  $T^b$ , подлежащих усвоению. Цель коррекции — уменьшить систематические ошибки (смещения, возможно, зависящие от состояния атмосферы или спутника) при определении  $T^b$ , причем в качестве истинных принимаются модельные  $T^b$ , рассчитанные с помощью радиационной модели RTTOV v. 12.2 [20]. Анализ обнаружил, что указанные ошибки связаны с так называемыми солнечными углами — направлением, с которого Солнце освещает спутник. В работе [10] описана схема циклического вариационного оценивания параметров соответствующей модели линейной регрессии и приведены результаты численных экспериментов, свидетельствующие о том, что применение разработанной схемы коррекции уменьшает не только глобальные смещения, но и переменные в пространстве и времени ошибки наблюдения. Для оперативных нужд была также разработана описанная ниже более простая схема коррекции.

### 3.2. Система автокоррекции ошибок в каналах МТВЗА-ГЯ

С осени 2020 г. функционирует в реальном времени система автокоррекции ошибок наблюдения, применимая как для атмосферных, так и для сканерных каналов, чувствительных к характеристикам подстилающей поверхности. Модель автокоррекции имеет следующий вид:

$$T^b = aT^a + b. \quad (1)$$

Здесь  $T^a$  — антенная температура, измеряемая прибором;  $T^b$  — яркостная температура, конечный результат процедуры коррекции. Задача состоит в оценке коэффициентов коррекции  $a$ ,  $b$ . Ввиду возможного временного дрейфа характеристик радиометра эти коэффициенты необходимо изменять со временем, для чего применена следующая схема их циклического обновления.

Пусть на  $(n - 1)$ -м шаге по времени получены оценки  $a_{n-1}$ ,  $b_{n-1}$ . Тогда на  $n$ -м шаге значения  $a_{n-1}$ ,  $b_{n-1}$  используются в качестве стартовых в схеме их обновления по текущим данным. В качестве данных взяты измеренные антенные температуры  $T^a(j)$ . Здесь и далее  $j$  обозначает номер пикселя, которому соответствует вектор измеренных яркостных температур во всех частотных каналах радиометра, на текущем шаге по времени. Коррекция наблюдений в разных каналах производится независимо, поэтому в данном пункте статьи авторы опускают номер канала (для упрощения записи). Данные наблюдений отбираются в 6-часовом “окне” усвоения (3 ч от срока анализа). В качестве “истины” использованы яркостные температуры  $T^{bf}(j)$ , вычисленные путем применения радиационной модели RTTOV к численному краткосрочному прогнозу, проинтерполированному по горизонтали и по времени (привлечены прогнозы с заблаговременностью 3, 6 и 9 ч) на центр соответствующего пикселя на поверхности Земли.

Заметим, что использование краткосрочного численного прогноза состояния атмосферы для коррекции ошибок спутниковых наблюдений эффективно, поскольку, во-первых, 6-часовой прогноз использует в качестве начальных данных поля современных систем усвоения данных, аккумулирующих информацию многочисленных и разнородных метеорологических наблюдений, — как следствие, такой прогноз имеет высокую точность, соизмеримую с точностью самих наблюдений. И во-вторых, прогноз расчи-

тывается для регулярной и густой сетки точек, что радикально упрощает процедуру сопоставления с ним анализируемых наблюдений (по сравнению с сопоставлением с другими наблюдениями).

К недостаткам использования численного прогноза по атмосферной модели как “истины” при коррекции спутниковых наблюдений следует отнести возможность внесения модельных смещений в скорректированные наблюдения. Но в данном случае авторы пренебрегают этим недостатком, так как величина смещений в данных МТВЗА-ГЯ значительно превышает возможные смещения прогноза. Другим фактором, ограничивающим применимость прогноза для коррекции спутниковых наблюдений, является то, что не все атмосферные поля прогнозируются одинаково хорошо. Так, точность прогноза полей гидрометеоров остается довольно низкой. Это не принципиально для атмосферных температурных каналов, но существенно для атмосферных влажностных и для сканерных каналов (см. ниже раздел 3.3).

Процедура обновления коэффициентов регрессии  $a_n, b_n$  на  $n$ -м шаге по времени состоит в минимизации функции потерь:

$$L(a, b) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [aT^a(j) - b - T^{bf}(j)]^2 + \frac{(a - a_{n-1})^2}{(\sigma_a)^2} + \frac{(b - b_{n-1})^2}{(\sigma_b)^2} \quad \text{min.} \quad (2)$$

Здесь  $N$  — число наблюдений;  $\sigma_a, \sigma_b$  — среднеквадратическое отклонение яркостной температуры от первого приближения (взятое равным соответствующему значению в нашей оперативной системе усвоения данных);  $a_{n-1}, b_{n-1}$  — эмпирически подобранные среднеквадратические отклонения, отражающие степень неопределенности стартовых (на данном шаге) оценок  $a, b$ . Первое слагаемое в выражении для функции потерь (2) характеризует ошибку скорректированного наблюдения, а второе и третье слагаемые играют роль регуляризатора, стабилизирующего оценки коэффициентов  $a, b$ . Функция потерь (2) квадратична по коэффициентам  $a, b$ , поэтому ее минимизация осуществляется путем решения системы двух линейных алгебраических уравнений с двумя неизвестными. В результате получаем текущие оценки  $a_n, b_n$ , которые будут использованы для коррекции наблюдений на следующем  $(n + 1)$ -м шаге и как стартовые значения при вычислении оценок  $a_{n+1}, b_{n+1}$  (благодаря чему происходит адаптация к изменяющимся со временем точностным характеристикам радиометра).

### 3.3. Результаты автокоррекции атмосферных каналов

Среднеквадратические ошибки до и после автокоррекции сигналов в атмосферных каналах, чувствительных к температуре (каналы 15—24), влажности (27—29), а также в сканерном канале 25 (наблюдения в окне прозрачности атмосферы), осредненные за 28 мая 2020 г. (всего 31691 профиль), приведены на рис. 1 (в каналах 11—14 и 26 нет данных). Первое приближение — 6-часовой прогноз GFS NCEP. Область — глобальная, наблюдения в канале 15 отбрасываются над морским льдом, а также над

сушей, если высота рельефа превышает 1 км, в канале 16 — при высоте рельефа более 3 км.

Данные измерений температуры подвергались контролю качества по сравнению с первым приближением и отбрасывались при отклонении более чем на 7 К. Данные влажностных каналов дополнительно отбрасывались при наличии облачности, как это описано ниже в разделе 3.4.

На рис. 1 видно, что автокоррекция дает радикальное уменьшение среднеквадратической ошибки наблюдений во всех атмосферных каналах. Основной эффект дает существенное уменьшение смещения, но среднеквадратические отклонения тоже уменьшаются (не показано).

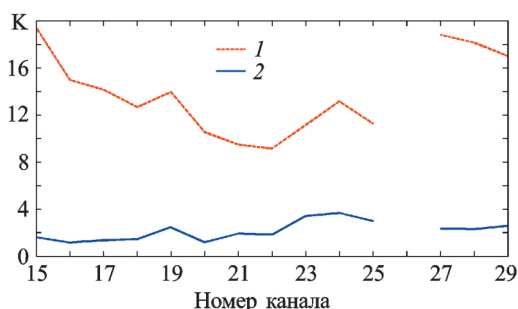


Рис. 1. Среднеквадратическая ошибка определения яркостной температуры в атмосферных каналах до (1) и после (2) автокоррекции.

### 3.4. Контроль качества наблюдений в сканерных каналах

Сканерные, а также влажностные каналы микроволновых радиометров чувствительны к облачности и осадкам, поэтому для коррекции их данных требуется модификация приведенной выше схемы с учетом этого фактора. Проблема, как отмечалось, состоит в низкой точности предсказания полей, связанных с облачностью, что не позволяет сопоставлять данные наблюдений в этих каналах с прогнозом так же, как для атмосферных температурных каналов. Однако такое сопоставление возможно в безоблачных условиях, поэтому мы детектируем облачность по наблюдениям в самих этих сканерных каналах (см. ниже в данном пункте) и исключаем наблюдения в соответствующих пикселях из рассмотрения при оценивании параметров модели автокоррекции (1). Кроме фильтрации облачности, дополнительно отбрасываем результаты наблюдений в тех ситуациях, когда радиационная модель RTTOV может иметь большие ошибки в задании излучательной способности подстилающей поверхности, а именно над сушей, морским льдом и водной поверхностью при сильном ветре. Все эти этапы отбраковки наблюдений входят в описываемую ниже процедуру контроля качества измерений.

Контроль качества наблюдений для каналов 1—10, а также 25-го канала МТВЗА-ГЯ производится после применения процедуры автокоррекции (1), параметры которой оценены по прошлым наблюдениям. Каналы 1—10 образуют пять пар с центральными частотами 10,6, 18,7, 23,8, 31,5 и 36,7 ГГц, измеренное излучение в каналах с нечетными номерами имеет вертикальную поляризацию, с четными — горизонтальную. Канал 25 имеет центральную частоту 91,6 ГГц, парный ему канал 26 в настоящее время не работает.

На первом этапе отбраковываются результаты наблюдений, для которых скорость прогностического приводного ветра превышает 15 м/с (порог определен эмпирически). Необходимость такой отбраковки обусловле-

на существенным снижением точности расчета излучательной способности морской поверхности с помощью модели FASTEM, входящей в RTTOV (вследствие образования пены при сильном приводном ветре [16]).

На втором этапе отбраковываются результаты наблюдения в условиях облачности и осадков с использованием так называемого индекса рассеяния, который определяется как разность яркостных температур в каналах с низкой и высокой частотой [9]. В данном случае задан индекс рассеяния как разность яркостных температур в одном из низкочастотных сканерных каналов (под номером  $i = 1, 2, \dots, 10$ ) и в высокочастотном 25-м канале:

$$si_i(j) = T_i^b(j) - T_{25}^b(j)$$

( $j$  — номер пикселя). Смысл этого индекса в том, что при наличии облаков и осадков рассеяние в них приводит к более сильному снижению яркостной температуры в высокочастотном канале ( $T_{25}^b$ ) по сравнению с низкочастотным ( $T_i^b$ ) и в результате к увеличению индекса рассеяния.

Процедура детектирования облачности и осадков по индексу рассеяния следующая. Вычисляется  $si_i^{90}$  — 90%-ный квантиль выборки  $si_i(j)$ , в которую входят все наблюдения, прошедшие контроль качества по приводному ветру в данном канале  $i$ . Выборка — глобальная во временном окне 6 ч. Наблюдение  $j$  считаем облачным, если хотя бы для одного  $i$  от 1 до 10 величина  $si_i(j)$  превышает  $si_i^{90}$ . В этом случае отбросим измерения во всех каналах с 1-го по 10-й, а также в 25-м канале (и во влажностных каналах 27—29).

На третьем этапе проводим отбраковку результатов облачных наблюдений по нормированной поляризационной разности. Для пары низкочастотных каналов ( $2s - 1, 2s$ ), отличающихся поляризацией, нормированная поляризационная разность определяется как

$$pd_s(j) = \frac{T_{2s-1}^b(j) - T_{2s}^b(j)}{T_{2s-1}^{bfc}(j) - T_{2s}^{bfc}(j)}. \quad (3)$$

Здесь  $s$  принимает значения от 1 до 5,  $T_s^{bfc}(j)$  — яркостная температура в соответствующем канале, полученная по первому приближению с помощью радиационной модели в предположении отсутствия облаков и осадков [19].

Физический смысл этого индикатора состоит в следующем. Микроволновое излучение от океана имеет преимущественно вертикальную поляризацию (например, [14]), поэтому в отсутствие облаков и осадков как поляризационная разность, вычисленная по результатам наблюдений,  $T_{2s-1}^b(j) - T_{2s}^b(j)$  (числитель в формуле (3)), так и модельная поляризационная разность (знаменатель в формуле (3)) положительны (напомним, нечетные каналы МТВЗА-ГЯ чувствительны к вертикально поляризованному излучению) и близки друг к другу, так как радиационная модель достаточно точна в безоблачных условиях. В результате нормированная поляризационная разность в безоблачных условиях близка к 1. Излучение облаков и осадков слабо поляризовано, поэтому их наличие приводит к ослаблению поляризации микроволнового излучения, измеряемого на спутнике в низкочастотных каналах 1—10 и, таким образом, к уменьшению поляри-

зационной разности, вычисленной по данным наблюдений (числитель в формуле (3)). При этом модельная поляризационная разность (знаменатель в формуле (3)) по определению нечувствительна к облакам, поэтому она остается существенно положительной. Это приводит к уменьшению нормированной поляризационной разности в облачных условиях.

Алгоритм детектирования облачности и осадков по величине поляризационной разности следующий. Находим  $pd_s^{10}$  — 10%-ный квантиль выборки  $pd_s(j)$ , состоящей из всех поляризационных разностей для данной пары каналов ( $2s - 1, 2s$ ), наблюдения в которых прошли контроль качества на предыдущих этапах. Авторы считают наблюдение  $j$  облачным, если хотя бы для одного  $s$  от 1 до 5 величина  $pd_s(j)$  меньше  $pd_s^{10}$ . Результат данного наблюдения бракуется по каналам так же, как и при контроле по индексу рассеяния.

Пороги детектирования облачности (90% для индекса рассеяния и 10% для нормированной поляризационной разности) были выбраны так, чтобы суммарный процент детектированных безоблачных сцен в глобальной выборке был в пределах 20—30%.

Отметим, что детектирование облачности и осадков по нормированной поляризационной разности возможно только над водной поверхностью, так как принципиальную роль играет сильная поляризация излучения от поверхности воды. Алгоритм, использующий индекс рассеяния, может быть применен и над сушей.

Результаты наблюдений, прошедшие все три этапа отбраковки, дополнительно отбрасываются, если отклонение от первого приближения превышает по модулю 7 К.

### 3.5. Результаты автокоррекции измерений в сканерных каналах

Результаты работы системы автокоррекции и контроля качества измерений в сканерных каналах, осредненные за ту же дату и с тем же первым приближением, что в разделе 3.3, приведены на рис. 2 (результаты типичны и качественно не изменяются ото дня ко дню). Показаны стандартные отклонения, а не более привычные среднеквадратические ошибки, так как остающиеся после процедуры автокоррекции смещения пренебрежимо малы. Область осреднения — глобальная, данные наблюдений берутся только над водной поверхностью без морского льда.

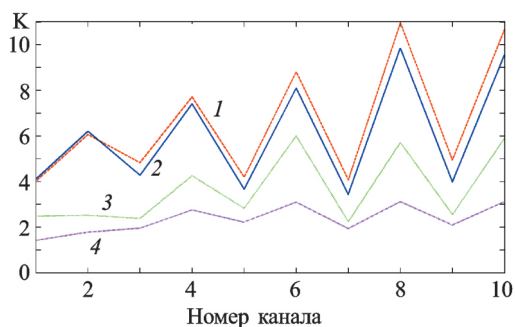


Рис. 2. Стандартное отклонение ошибки яркостной температуры в сканерных каналах после автокоррекции: 1 — без контроля качества и отбраковки по наличию облаков; 2 — после отбраковки наблюдений с сильным приводным ветром; 3 — после отбраковки наблюдений с сильным приводным ветром и отбраковки по индексу рассеяния; 4 — после отбраковки наблюдений с сильным приводным ветром, по индексу рассеяния и по поляризационной разности.



Фильтрация сцен с сильным приводным ветром (линия 2 на рис. 2) вносит минимальный, хотя и положительный вклад в уменьшение среднеквадратической ошибки. Отбраковка по индексу рассеяния (линия 3) существенно улучшает качество прошедших контроль наблюдений. Наконец, отбраковка по поляризационной разнице (линия 4) тоже дает положительный вклад в уменьшение стандартного отклонения ошибки, соизмеримый с отбраковкой по индексу рассеяния. Последняя стадия — отбраковка по отклонению от первого приближения — дает минимальный эффект и не показана на рис. 2. В результате удается уменьшить стандартное отклонение ошибки наблюдений в сканерных каналах от первого приближения с 4—11 К до примерно 1,5—3 К.

Доли отбракованных наблюдений на всех четырех этапах контроля качества следующие (ориентировочно): отбраковка по приводному ветру — 5%, отбраковка по индексу рассеяния — 20—25%, отбраковка по поляризационной разности — 15—20%, отбраковка по отклонению от первого приближения — менее 2%.

#### 4. Инфракрасные гиперспектральные наблюдения

Российский инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 [2, 21], работающий на спутнике “Метеор-М” № 2, регистрирует спектр уходящего теплового излучения в диапазоне от 5 до 15  $\mu\text{м}$  в 2670 каналах со спектральным разрешением 0,7—1,4  $\text{см}^{-1}$ . Европейский гиперспектральный инфракрасный зондировщик IASI, устанавливаемый на спутники серии “Metop”, измеряет спектр в диапазоне от 3,62 до 15  $\mu\text{м}$  в 8461 каналах со спектральным разрешением 0,5  $\text{см}^{-1}$ . Полоса обзора у ИКФС-2 — от 1000 до 2000  $\text{км}$  с разрешением в надире 30  $\text{км}$ , у IASI — 2130  $\text{км}$  с разрешением 12  $\text{км}$ .

Усваиваются данные измерений ИКФС-2 и IASI в диапазоне волновых чисел 680—750  $\text{см}^{-1}$ , чувствительные преимущественно к температуре тропосферы и стратосферы (а также к наличию облаков). При низком приземном давлении (чаще в горной местности) наблюдения в этом диапазоне длин волн могут быть чувствительны и к характеристикам подстилающей поверхности.

##### 4.1. Последовательность преобразований исходных данных наблюдений перед усвоением

Данные наблюдений подвергаются следующим преобразованиям.

1. Применение процедуры коррекции смещений [13].
2. Отбраковка каналов, чувствительность измерений в которых к атмосферным уровням выше 1  $\sigma_{Pa}$  (верхний уровень используемого в анализе первого приближения) превышает 10% максимальной чувствительности.
3. Отбраковка каналов, излучение в которых существенно “загрязнено” вкладом облаков и подстилающей поверхности. Для этого применяется процедура, описанная в работе [18]; ее суть состоит в анализе профиля отклонений измеренных яркостных температур от первого приближения, при вычислении которого в радиационной модели не учитывается облачность (по причине, указанной выше в первом абзаце раздела 3.4). Если

эти отклонения в ряде соседних упорядоченных по вертикали каналов превышают по абсолютной величине некоторый порог (в представленной схеме равный 0,7 К), то все нижележащие каналы отбрасываются.

4. Дополнительный контроль качества по отклонению от первого приближения, предельно допустимое отклонение выбрано равным 1,5 К (что приводит к отбраковке 0—3% наблюдений).

#### 4.2. Схема выбора каналов инфракрасных зондировщиков ИКФС-2 и IASI

В основе предлагаемой схемы лежит поиск минимального набора каналов с максимально разными якобианами. Заметим, что якобианом  $J(p_l)$  (где  $p_l$  — давление на  $l$ -м уровне сетки анализа) принято называть вектор частных производных измеряемого излучения по значениям анализируемого поля — в данном случае температуры, — представленного на вертикальной сетке анализа. На рис. 3 показаны якобианы для рассматриваемых каналов ИКФС-2.

Из данных рис. 3 очевидна избыточность полного (и даже прореженного вдвое) комплекта каналов, так как якобианы соседних (а иногда и более отдаленных по списку) каналов очень похожи и, следовательно, в этих каналах измеряется практически одна и та же величина (это связано с тем, что фактически измеряется непрерывный спектр излучения, представленный на густой дискретной сетке точек в спектральном пространстве). Поэтому необходимо найти подмножество каналов с наименее похожими якобианами. В качестве меры непохожести двух якобианов использован угол между ними в линейном пространстве со скалярным произведением

$$(u, v) = u_i v_i \log(p_i),$$

где  $\log(p_l)$  — толщина  $l$ -го слоя вертикальной сетки.

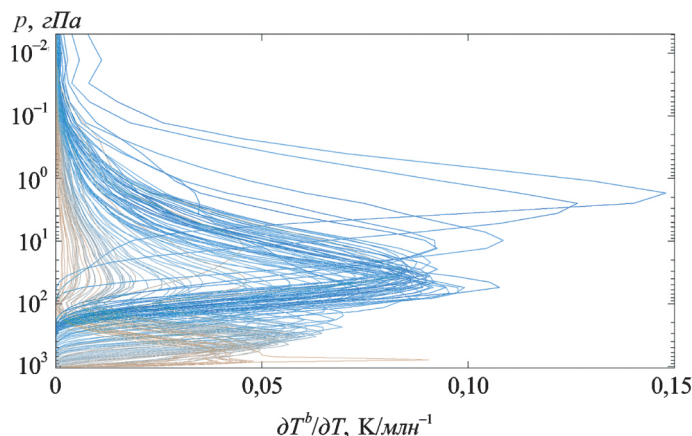


Рис. 3. Якобианы (по температуре) для произвольно выбранного профиля измерений ИКФС-2 (каждый второй канал в полосе 680—750  $см^{-1}$ , всего 100 каналов).

Среди каналов, прошедших все стадии контроля качества, выбираем канал с наилучшей вертикальной локализацией, а именно с минимальной шириной якобиана:

$$W_i = \frac{J_i(p_i) \log(p_i)}{\max_i (J_i(p_i))}.$$

Номер этого канала обозначим через  $i_1$ . Далее действуем по индукции. Пусть в процедуре отбора каналов для усвоения уже отобрано  $n$  каналов с номерами  $i_1, i_2, \dots, i_n$  и в линейном пространстве  $S_n$ , натянутом на первые  $n$  якобианов, имеется ортонормированный базис  $e_1, e_2, \dots, e_n$ . В нашем алгоритме  $e_1 = \frac{J_{i_1}}{\|J_{i_1}\|}$ , где норма определяется через равенство  $\|u\|^2 = (u, u)$ . Най-

дем  $(n + 1)$ -й отобранный канал и  $(n + 1)$ -й базисный вектор  $e_{n+1}$ . Пусть  $k$  — произвольный канал, который еще не был отобран. Чтобы найти угол между его якобианом  $J_k$  и пространством  $S_n$ , вычислим проекцию  $J_k$  на данное пространство

$$P(J_k) = (J_k, e_1)e_1 + (J_k, e_2)e_2 + \dots + (J_k, e_n)e_n$$

и косинус угла между  $J_k$  и  $S_n$ :

$$\cos(\alpha_k) = \frac{(P(J_k), J_k)}{\|P(J_k)\| \|J_k\|}.$$

Выберем под номером  $i_{n+1}$  канал, для которого угол  $\alpha_k$  будет наибольшим. Соответствующим базисным вектором будет, очевидно, нормированный вектор перпендикуляра на пространство  $S_n$ , т. е.  $e_{n+1} = (J_k - P(J_k))/\|J_k - P(J_k)\|$ . Повторяем данный процесс, пока не окажется, что все оставшиеся каналы практически полностью лежат в пространстве уже отобранных каналов (т. е. угол  $\alpha_{n+1} < \epsilon$ , где  $\epsilon$  — внешний малый параметр), либо не закончатся каналы, либо число выбранных для усвоения каналов не станет равным заданному максимально допустимому числу. Заметим, что величина

$$V_n = \sin(\alpha_2)\sin(\alpha_3) \dots \sin(\alpha_n)$$

— это объем  $n$ -мерного параллелепипеда, натянутого на нормированные векторы якобианов отобранных каналов  $J_1, J_2, \dots, J_n$ . Данная величина характеризует степень взаимной ортогональности данного подмножества векторов (каналов). По окончании работы алгоритма величина  $V_n$  может быть использована как “индекс непохожести” итогового выбранного подмножества каналов, принимающий значения от 0 до 1.

В экспериментах с реальными данными выяснилось, что если выбрать  $\epsilon = 0,001$ , то отбор проходят 5—8 каналов. Это неплохо согласуется с результатами оценки так называемого числа степеней свободы сигнала (degrees of freedom for signal) или “независимых компонентов информации”, полученными для рассматриваемой спектральной области в работах [8, 22]. При этом величина индекса непохожести для вышеописанного метода выбора каналов на 2—3 порядка больше, чем для простейшего выбора такого же количества каналов с равномерным шагом по их номеру. Это значит, что выбранные с использованием предложенной методики каналы более независимы и, следовательно, более информативны, чем без ее использования. Эксперименты также показали, что набор каналов существ-

венно изменяется от точки к точке. Вышеописанная схема отбора каналов вычислительно малозатратна, что позволяет ее применять для каждого измеренного спектра излучения независимо — в отличие от традиционного выбора постоянного множества наиболее информативных каналов [8, 21].

#### 4.3. Результаты усвоения данных ИКФС-2 и IASI

Сравнивались три конфигурации разработанной глобальной системы усвоения данных: 1) без радиационных наблюдений, 2) с наблюдениями ИКФС-2 и 3) с наблюдениями IASI. Усвоение данных ИКФС-2 и IASI производилось с использованием вышеописанного алгоритма выбора наиболее информативных каналов. Продолжительность эксперимента составляла пять дней в декабре 2020 г. Область — глобальная. Верифицировались 6-часовые прогнозы в циклической схеме усвоения данных с использованием модели ПЛАВ путем сравнения с независимыми “пассивными” (т. е. не усваивавшимися) наблюдениями в каналах 5—10 AMSU-A спутника “Метор-В”, летающего на той же “утренней” орбите, что “Метеор-М” № 2. На рис. 4 представлены средние за 13 шестичасовых сроков среднеквадратические ошибки в глобальной области по всем верифицирующим каналам AMSU-A для вышеупомянутых трех конфигураций.

Из данных рис. 4 можно сделать вывод, что усвоение наблюдений ИКФС-2 и IASI с использованием разработанной схемы выбора наиболее информативных каналов дает существенный положительный эффект. При сравнении первого приближения с независимыми наблюдениями AMSU-A среднеквадратическая ошибка первого приближения примерно одинаково (в относительных величинах) уменьшается для всех проанализированных каналов 5—10 AMSU-A. То есть оба зондировщика — и IASI, и ИКФС-2 — дают сопоставимые результаты.

Существенное улучшение от усвоения инфракрасных наблюдений ИКФС-2 или IASI (в терминах яркостных температур каналов радиометра AMSU-A) обусловлено тем, что якобианы (и соответствующие им весовые функции) инфракрасных наблюдений в рассматриваемом диапазоне волновых чисел и в отсутствие облачности похожи на якобианы (и весовые функции) микроволновых наблюдений в каналах 5—10 AMSU-A. Это сходство приводит к тому, что как инфракрасные, так и микроволновые измерения в рассматриваемых диапазонах длин волн чувствительны к средним температурам примерно одних и тех же достаточно толстых слоев атмосферы. Циклическая система усвоения данных подстраи-

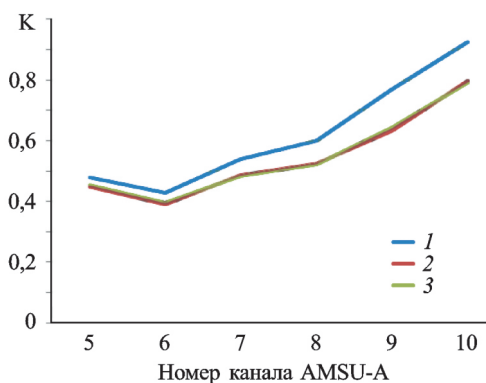


Рис. 4. Среднеквадратические ошибки первого приближения (6-часового прогноза) по всем верифицирующим каналам AMSU-A: 1 — для конфигурации без усвоения инфракрасных наблюдений (1); 2 — с усвоением данных IASI; 3 — с усвоением данных ИКФС-2.

ется к усваиваемым на каждом цикле наблюдениям ИКФС-2 или IASI, уменьшая ошибки анализов и прогнозов этих средних значений температуры, что и фиксирует сравнение с независимыми наблюдениями AMSU-A.

В работе [6] приведены результаты численных экспериментов по влиянию усвоения данных ИКФС-2 на трехсуточный прогноз. В тех экспериментах не было отбора наиболее информативных каналов — отбирался каждый 10-й канал в пределах указанной выше полосы  $680\text{—}750\text{ см}^{-1}$ . Эффект от усвоения данных ИКФС-2 был ощутим в Южном полушарии и составлял примерно  $0,1\text{ К}$  в тропосфере.

## 5. Заключение

Кратко охарактеризована технология использования наблюдений спутниковых атмосферных зондировщиков в системе усвоения данных Гидрометцентра России. Представлены результаты недавних работ по анализу и коррекции данных наблюдений спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, а также по обработке и выбору наиболее информативных наблюдений (каналов) гиперспектральных инфракрасных зондировщиков ИКФС-2 и IASI (МТВЗА-ГЯ и ИКФС-2 входят в полезную нагрузку спутников серии “Метеор-М”). В дополнение к установленному ранее [1] положительному эффекту усвоения данных МТВЗА-ГЯ продемонстрирован положительный эффект от использования данных ИКФС-2 и IASI в системе усвоения данных.

Дальнейшее развитие оперативной системы усвоения данных наблюдений Гидрометцентра России в контексте использования результатов спутниковых наблюдений будет вестись по следующим направлениям: усвоение данных микроволновых и инфракрасных наблюдений в условиях облачности и осадков (“all-sky assimilation” [11]); уточнение и усложнение модели ошибок спутниковых наблюдений в системе усвоения; восстановление (по микроволновым и инфракрасным наблюдениям) характеристик подстилающей поверхности (температура поверхности океана, морской лед, снег), необходимых для разработанной системы усвоения данных; использование спутниковых наблюдений ветра (AMV) по полям облачности и влажности с недавно запущенного на высокоэллиптическую орбиту спутника “Арктика-М”; развитие и внедрение более совершенных методов анализа и усвоения радиозатменных наблюдений и усвоение данных спутниковых лидарных измерений ветра.

## Литература

1. 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.
2. Поляков А. В., Тимофеев Ю. М., Виротайнен и др. Спутниковый атмосферный зондировщик ИКФС-2. 1. Анализ измерений спектров уходящего излучения. — *Исследование Земли из космоса*, 2016, № 5, с. 71—78.
3. Толстых М. А., Фадеев Р. Ю., Шляева А. В. и др. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. — М., Триад-ЛТД, 2017, 166 с.

- 4. Успенский А. Б., Асмус В. В., Козлов А. А. и др.** Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ. — Исследование Земли из космоса, 2016, № 5, с. 57—70.
- 5. Цырульников М. Д., Свиренко П. И., Гайфулин Д. Р. и др.** Новая технология циклического усвоения данных на основе схемы анализа 3D-VAR. /В сб.: Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 43, 2016, с. 3—12; <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb43/cirul.pdf>.
- 6. Цырульников М. Д., Свиренко П. И., Гайфулин Д. Р. и др.** Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России. — Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2019, № 4, с. 112—126.
- 7. Asch M., Bocquet M., and Nodet M.** Data assimilation: Methods, algorithms, and applications. — Society for Industrial and Applied Mathematics, 2016.
- 8. Collard A. D.** Selection of IASI channels for use in numerical weather prediction. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2007, vol. 133, No. 629, pp. 1977—1991.
- 9. Ferraro R. R., Grody N. C., and Marks G. F.** Effects of surface conditions on rain identification using the DMSP-SSM/I. — Remote Sens. Rev., 1994, vol. 11, No. 1—4, pp. 195—209.
- 10. Gayfulin D., Tsyruльников M., and Uspensky A.** Assessment and adaptive correction of observations in atmospheric sounding channels of the satellite microwave radiometer MTVZA-GY. — Pure and Appl. Geophys., 2018, vol. 175, pp. 3653—3670.
- 11. Geer A. J., Lonitz, K., Weston P., et al.** All-sky satellite data assimilation at operational weather forecasting centres. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2018, vol. 144, No. 713, pp. 1191—1217.
- 12. Gorbunov M. E., Kirchengast G., and Lauritsen K. B.** Generalized canonical transform method. — Atmos. Measur. Techn., 2021, vol. 14, No. 2, pp. 853—867.
- 13. Harris B. A. and Kelly G.** A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2002, vol. 127, pp. 1453—1468.
- 14. Kidd C.** On rainfall retrieval using polarization-corrected temperatures. — Int. J. Remote Sens., 1998, vol. 19, No. 5, pp. 981—996.
- 15. Lazzara M. A., Dworak R., Santek D. A., et al.** High-latitude atmospheric motion vectors from composite satellite data. — J. Appl. Meteorol. and Climatol., 2014, vol. 53, No. 2, pp. 534—547.
- 16. Liu Q., Weng F., and English S. J.** An improved fast microwave water emissivity model. — IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens., 2010, vol. 49, No. 4, pp. 1238—1250.
- 17. McNally A.** The impact of satellite data on NWP. /In: Proceedings of the ECMWF Seminar on Use of Satellite Observations in NWP, 2014, pp. 8—12.
- 18. McNally A. P. and 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.
- 19. Petty G. W. and Katsaros K. B.** Precipitation observed over the South China Sea by the Nimbus-7 scanning multichannel microwave radiometer during winter MONEX. — J. Appl. Meteorol. and Climatol., 1990, vol. 29, No. 4, pp. 273—287.
- 20. Saunders R., Hocking J., Turner E., et al.** An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). — Geosci. Model Develop., 2018, vol. 11, No. 7, pp. 2717—2737.
- 21. Timofeyev Y. M., Uspensky A. B., Zavelevich F. S., et al.** Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2—Four years in orbit. — J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 2019, vol. 238, 106579.
- 22. Ventress L. and Dudhia A.** Improving the selection of IASI channels for use in numerical weather prediction. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2014, vol. 140, No. 684, pp. 2111—2118.
- 23. Verhoef A., Portabella M., and Stoffelen A.** High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast. — IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2012, vol. 50, No. 7, pp. 2481—2487.
- 24. Witschas B., Lemmerz C., Geib, et al.** First validation of Aeolus wind observations by airborne Doppler wind lidar measurements. — Atmos. Measur. Techn., 2020, vol. 13, No. 5, pp. 2381—2396.