

*Ю.С. Четырин, А.Н. Давиденко*

## **МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКИМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕНТРА**

Исследования по усвоению спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА) в прогностических моделях NCER (США), Метеослужб Великобритании и Канады, Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды говорят о том, что указанные данные могут значительно дополнить наблюдения наземной сети станций аэрологического зондирования, что особенно актуально для Дальневосточного региона. В связи с этим в последние годы в Дальневосточном центре ФГБУ «НИЦ «Планета» большое внимание уделяется совершенствованию методов ТВЗА, повышению достоверности и точности результатов атмосферного зондирования.

Дальневосточный регион имеет разреженную по сравнению с ЕТР сеть метеорологических наблюдательных станций, при этом сеть аэрологических станций, способных давать информацию о вертикальных профилях температуры, влажности, геопотенциальных высотах стандартных изобарических поверхностей и параметров ветра на них, еще более ограничена. Вследствие большого удаления этих станций друг от друга, множество атмосферных процессов локального масштаба, характерных для Дальневосточного региона, остаются не замеченными при синоптическом анализе, что сказывается на качестве краткосрочных прогнозов погоды, построении численных прогностических и климатических моделей. Поэтому от ФГБУ «Дальневосточное УГМС» поступил запрос в Дальневосточный центр ФГБУ «НИЦ «Планета» о

возможности предоставления дополнительных источников информации о параметрах вертикальных профилей атмосферы, особенно над водной поверхностью, как наименее освещенной результатами фактических наблюдений.

Таким образом, перед специалистами Дальневосточного центра ФГБУ «НИЦ «Планета» была поставлена задача обобщить опыт восстановления данных ТВЗА, провести адаптацию имеющихся методов для Дальневосточного региона и внедрить технологию восстановления вертикальных профилей параметров атмосферы в оперативный режим с представлением в виде полей метеорологических величин, удобных для обработки в прогностических моделях.

Несмотря на многолетний опыт работ в области получения данных ТВЗА из космоса, до сих пор нельзя утверждать, что с помощью спутникового метода удастся определить данные ТВЗА с необходимыми характеристиками (точность, вертикальное и пространственное разрешение и т. д.) в оперативном режиме при любом состоянии атмосферы.

В связи с этим возникла необходимость провести анализ возможностей температурно-влажностного зондирования атмосферы с помощью аппаратуры, установленной на космических аппаратах, информацию с которых принимает Дальневосточный центр.

В ходе изучения существующих программ и подходов для восстановления вертикальных профилей параметров атмосферы в дальнейших исследованиях участвовали два комплекса инструментов зондирования атмосферы:

1. Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS) КА серии спутников «NOAA» и КА «Metop-B», имеющий в составе

- а) ИК зондировщик HIRS/4; зондировщик AMSU-A;
- б) 5-канальный зондировщик AMSU-B;
- в) 5-канальный зондировщик MHS [1];

2. Cross-track Infrared Sounder (CrIS) КА «Suomi NPP», имеющий 1305 спектральных каналов и обеспечивающий зондирование в 3-х диапазонах волн [2].

Обработка информации по данным ATOVS производилась с использованием программного продукта International ATOVS Processing Package (IAPP) [3], который был разработан для восстановления температуры и влажности атмосферы, определения общего содержания

озона и других параметров, как в ясную, так и в облачную погоду. Процесс получения исходных данных и восстановления температуры и влажности атмосферы состоит из трех основных этапов: прием телеметрических данных, их предварительная обработка, восстановление искомым параметров [4].

Алгоритм восстановления данных, в свою очередь, разбивается на три этапа: определение наличия облачности, восстановление вертикальных профилей температуры и влажности в первом приближении регрессионным методом, расчет вертикальных профилей нелинейным методом.

Обработка информации с прибора CrIS производилась с использованием программного продукта Community Satellite Processing Package (CSPP) [5]. В ходе проведенных исследований была обработана имеющаяся информация за 2011 и 2012 гг. и создан архив, содержащий 2788 восстановленных профилей спутниковых данных с КА серии «NOAA» и 538 профилей с КА «Suomi NPP».

Совместно со специалистами ОМО РВЦ ФГБУ «Дальневосточное УГМС» были проведены испытания метода восстановления полей температуры воздуха на основных изобарических уровнях по данным спутникового зондирования с приборов ATOVS и CrIS. Погрешности восстановленных данных (2–4 °С в пограничном слое, 1–2 °С на уровнях 700–300 гПа и до 1 °С на верхних уровнях (200–100 гПа)) в целом соответствуют требованиям к измерениям, сформулированным рабочими группами ВМО (Всемирной метеорологической организации) и близки к результатам валидации алгоритмов восстановления данных ТВЗА, разработанных ранее (поля анализа и прогноза моделей двух наиболее развитых метеорологических центров: Экзетер и GFS (NCEP), заблаговременности 00 ч, и модели WRF-ARW версии «Хаб-15» с горизонтальным разрешением 15 км, заблаговременности 00 и 24 ч). Некоторые из полученных результатов представлены в таблице.

Опираясь на полученные результаты испытаний, даны рекомендации об использовании данных, полученных при космическом зондировании атмосферы, в качестве вспомогательного материала для анализа полей температуры.

В ходе испытаний стало очевидным, что в условиях оперативной работы усвоение измерений спутникового ТВЗА при составлении

Результаты сравнения восстановленных значений температуры воздуха на стандартных изобарических уровнях по данным спутникового радиозондирования с данными прогностических моделей

Сезон	Метод	Среднее арифметическое различие (Еар)										Среднее по уровням
		Уровень, гПа										
		1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	
Зима	Спутник	-4,0	-0,7	0,0	0,1	0,3	0,7	0,6	0,2	-0,1	-0,1	-0,3
	Экзетер (00)	-2,0	0,3	-0,0	-0,0	0,0	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,4	-0,1
	GFS (00)	-1,7	-0,4	-0,2	-0,4	-0,2	0,1	-0,1	-0,3	-0,1	0,2	-0,4
	WRF(00)	-1,6	-0,4	0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,3	0,2	0,1	-0,2
	WRF(24)	-2,6	-0,4	0,2	0,1	0,1	-0,5	0,1	1,5	1,4	0,8	-0,1
Весна	Спутник	-3,3	-0,9	0,2	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0	0,7	0,4	0,0
	Экзетер (00)	-0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,1
	GFS (00)	-0,7	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,2	0,1	-0,1	0,1	0,4	-0,1
	WRF(00)	-0,7	-0,0	0,0	-0,0	-0,1	-0,1	-0,0	0,3	0,7	0,4	0,1
	WRF(24)	0,2	0,6	0,3	0,3	0,3	-0,0	-0,1	1,1	1,6	0,5	0,5
Лето	Спутник	-2,6	-1,2	0,6	1,3	1,2	1,0	1,2	1,1	0,7	0,1	0,2
	Экзетер (00)	0,2	0,0	-0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1
	GFS (00)	-0,5	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	0,1	-0,2
	WRF(00)	-0,8	-0,3	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,1	0,3	0,1	-0,2
	WRF(24)	0,4	-0,1	0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,6	0,4	0,8	-0,5	0,0

Таблица (окончание)

Сезон		Среднее арифметическое различие (Бар)											Среднее по уровням
		Метод	Уровень, гПа										
			1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	
Осень	Спутник	-2,9	-0,6	0,4	0,8	0,7	0,9	0,9	0,2	0,7	0,2	-0,1	0,1
	Экзетер (00)	-0,4	0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,0	-0,0	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1
	GFS (00)	-0,7	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,1	-0,2	-0,5	-0,3	0,1	0,1	-0,3
	WRF(00)	-0,8	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	0,1	0,1	0,1	-0,0	-0,2
	WRF(24)	-0,8	-0,3	-0,1	-0,2	-0,2	-0,6	-0,6	0,8	0,9	0,9	-0,3	-0,2
Год	Спутник	-3,3	-0,9	0,3	0,7	0,7	0,9	0,9	0,7	0,3	0,3	0,1	0,0
	Экзетер (00)	-0,8	0,2	-0,0	-0,0	-0,1	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	-0,0
	GFS (00)	-1,0	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,0	-0,1	-0,3	-0,1	0,2	0,2	-0,2
	WRF(00)	-1,0	-0,3	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	-0,2
	WRF(24)	-0,8	-0,1	0,1	0,0	-0,0	-0,3	-0,4	0,9	1,1	-0,0	-0,0	-0,0

*Примечание.* Экзетер и GFS (Вашингтон) – модели двух наиболее научно развитых метеорологических центров, рассчитывающих данные в сетке  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  и  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  соответственно, заблаговременности 00 ч; WRF-ARW – модель версии «Хаб-15» с горизонтальным разрешением 15 км, заблаговременности 00 и 24 ч, использующая в качестве начальных данных прогнозы GFS заблаговременности 24 ч и функционирующая в РВЦ ФГБУ «Дальневосточное УГМС» в оперативном режиме с марта 2011 г.

прогнозов погоды синоптиком имеет определенные сложности. Это, прежде всего, длительный и трудоемкий процесс обработки, неудобство предоставления информации для визуальной оценки, сдвиг по времени относительно общепринятых сроков аэрологического зондирования.

Для первичной обработки рассчитанных данных была создана программа с использованием языка программирования IDL. Данный язык позволяет работать с такими форматами данных, как NetCDF (выходной формат для спутников серии «NOAA», «Metop-A», «Metop-B») и HDF5 (выходной формат для спутника «Suomi NPP»). В разработанной программе производится чтение и привязка данных, отсеивание некорректных значений, расчет температуры, дефицита точки росы, высоты геопотенциала, направления и скорости ветра. Визуализированные данные о температуре на основных изобарических поверхностях за сроки 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ ежедневно выкладываются на сайте Дальневосточного центра ФГБУ «НИЦ «Планета». Пример представлен на [рисунке](#).

В результате проведенных консультаций со специалистами ФГБУ «Дальневосточное УГМС» сделан вывод, что самым результативным способом внедрения информации, передаваемой Дальневосточным центром ФГБУ «НИЦ «Планета», в оперативную работу синоптика является возможность отображения данных в ПАК «ГИС-Метео». ГИС – это аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно-координированных данных. Другими словами, можно сказать, что ГИС – специализированная система, которая предоставляет собой интерактивный и работающий в режиме реального времени инструмент, предназначенный для использования в оперативной работе синоптиков.

Совместно с сотрудниками Вычислительного центра ФГБУ «Дальневосточное УГМС» были изучены возможности системы и выяснено, что внедрение данных в программу возможно в текстовом формате.

Все данные, рассчитанные в Дальневосточном центре ФГБУ «НИЦ «Планета», сохраняются в текстовом файле в формате, адаптированном для усвоения в «ГИС-Метео», где специалист-синоптик имеет возможность визуализации рассчитанных параметров в виде изолиний, численных значений, или создания цветокодированных карт, т.е. получать информацию в тех форматах, с которыми он привык работать.

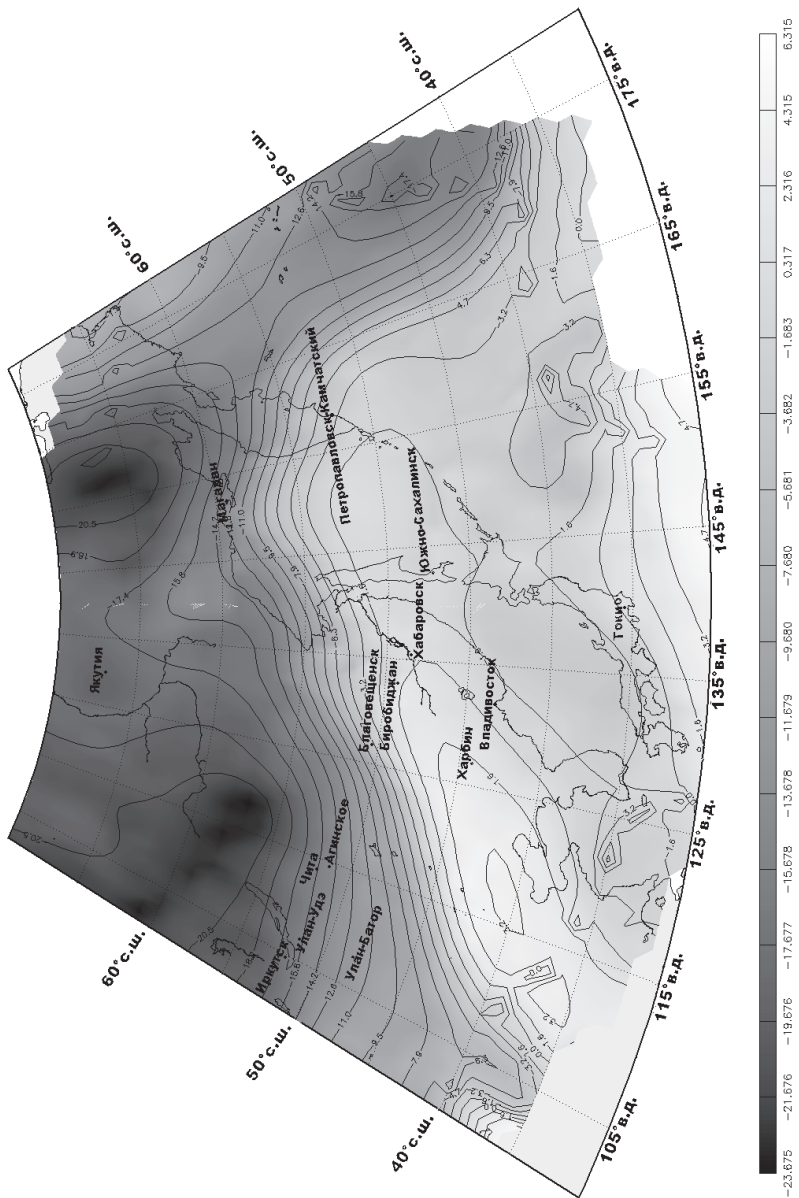


Рис. Восстановленные значения температуры на 700 гПа за 1 мая 2014 года.

С целью оперативности данных, а также для получения комплексной картины синоптической ситуации, текстовые файлы с восстановленными данными полей метеовеличин формируются как по отдельному витку, так и в виде монтажа последовательных витков. При этом есть возможность создания «одномоментных» монтажей, например, первый виток с «NOAA-16», второй виток с «NOAA-18», третий с «NOAA-19», причем они должны быть максимально близки по времени. Такой подход сокращает время между первым и последним витками монтажа от 3,5 до 2 часов, что более наглядно для оперативного анализа активных процессов.

Возможность совмещения в «ГИС-Метео» рассчитанных значений температуры по спутниковым данным с данными фактического зондирования и модельными данными позволила провести дополнительную верификацию и первичное испытание обработанных спутниковых данных.

По оценке специалистов ФГБУ «Дальневосточное УГМС» полученные в рамках испытаний результаты вполне конкурентоспособны с полями соответствующих метеовеличин, построенных в кодах ГРИБ (ГРИД), однако по краям витков наблюдается некоторое завышение относительно данных фактического аэрологического зондирования, что требует дополнительного «отсеивания» некорректных значений. Возможность более качественного и максимально точного построения профилей обеспечивается варьированием коэффициента размытия функции Гаусса при сглаживании полей. Это позволяет при обработке информации более детально отразить движение воздушных масс в локальных процессах, характерных для Дальневосточного региона: выносах теплых масс со стороны Японского и Охотского морей и прохождении ныряющих циклонов, сформировавшихся в Якутии.

В результате проведенных исследований разработана технология, позволяющая визуально проводить качественную оценку полей температуры, восстановленных по информации со спутника, и сопоставлять их с полями, рассчитанными гидродинамическими моделями в «ГИС-Метео».

Апробация показала перспективность использования технологии в практической деятельности гидрометеорологических центров.



Значительно увеличено количество сроков построения фактических вертикальных профилей температуры воздуха, аналогичных аэрологическим, что дает возможность дополнительного синоптического анализа локальных процессов и процессов над наиболее слабоосвещенной фактическими данными водной поверхностью.

Дальнейшая программно-математическая адаптация разработанных алгоритмов позволит использовать восстановленные со спутников вертикальные профили параметров атмосферы в качестве входных данных в различных гидродинамических прогностических моделях.

Одновременно с решением данной задачи параллельно решена задача возможности передачи в коде КН-04 восстановленных со спутника вертикальных профилей параметров атмосферы с целью частичной замены отсутствующих данных аэрологического зондирования за сроки 00 и 12 ч ВСВ.

ЦМКП на заседании от 30 мая 2014 г.:

– одобрила работу Дальневосточного центра ФГБУ «НИЦ «Планета» по созданию метода восстановления температуры воздуха на стандартных изобарических уровнях 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 200, 100, 50, 30, 10 гПа по данным спутникового радиозондирования со следующих приборов: ATOVS (КА серии «NOAA») и VIIRS (КА «Suomi NPP»);

– рекомендовала авторам метода продолжить работу по совершенствованию метода и технологии с целью повышения качества получаемой продукции;

– отметила, что разработанный метод восстановления температуры воздуха важен для решения оперативных задач, возложенных на ФГБУ «Дальневосточное УГМС».

ЦМКП постановила использовать ФГБУ «Дальневосточное УГМС» представленный метод в качестве вспомогательного материала для оценки полей температуры на стандартных изобарических поверхностях.

#### Список литературы

1. Ли Дж., Вольф В., Менцель П. Глобальное зондирование атмосферы инструментом ATOVS: алгоритм и валидация // Журнал прикладной метеорологии. – 2000. – № 39. – С. 1248–1268.

2. Международный пакет обработки данных с ATOVS [Электронный ресурс]: электронные данные Висконсин-Мэдисон, США: Кооператив институтов метеорологических космических исследований, Университет Висконсина-Мэдисона, 2000. URL: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/>

3. Национальное управление океанических и атмосферных исследований NOAA [сайт]. URL: <http://www.noaa.gov/about-noaa.html> (дата обращения 11.07.2014).

4. Национальный комитет по астронавтике и исследованию космического пространства NASA [сайт]. URL: <http://npp.gsfc.nasa.gov/suomi.html> (дата обращения 11.07.2014).

5. Сообщество пакета спутниковой обработки (CSPP). CSPP гиперспектральное восстановление [Электронный ресурс]: электронные данные Висконсин-Мэдисон, США: Центр науки о космосе и инженерии, Университет Висконсин-Мэдисон, США. 2012. URL: <http://cimss.ssec.wisc.edu/cspp/download/>