

С.В. Афонин, В.В. Белов, М.В. Энгель, А.М. Кох

## Разработка в ИОА СО РАН базы данных региональной спутниковой информации и программного обеспечения для ее обработки

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 4.10.2004 г.

Дается общее описание разрабатываемого в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН информационно-программного комплекса, в основе которого лежат архивы региональной цифровой спутниковой информации (MODIS, NOAA) и программное обеспечение для ее первичной и тематической обработки. Назначение комплекса – решение широкого круга задач дистанционного зондирования из космоса параметров атмосферы и подстилающей поверхности, а также изучение пространственной и временной изменчивости параметров окружающей среды в Западной Сибири. Программный блок комплекса создается на основе как общеизвестных, так и оригинальных, разработанных в ИОА СО РАН, программных средств обработки спутниковых измерений.

### Введение

В Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН в настоящее время ведется активная работа по созданию информационно-программного комплекса [1–7], предназначенного для решения широкого круга задач по проблемам дистанционного зондирования из космоса параметров атмосферы и подстилающей поверхности, а также проведения исследований про-

странственной и временной изменчивости параметров окружающей среды в Западной Сибири. Информационный блок комплекса представляет собой базы, формирующиеся на основе цифровой информации различных спутниковых систем (AVHRR, ATOVS, MODIS, SPOT, TOMS). Данные получены для региона, включающего территории Новосибирской, Томской, Омской, Тюменской, Кемеровской областей и Алтайского края, части Казахстана (рис. 1).

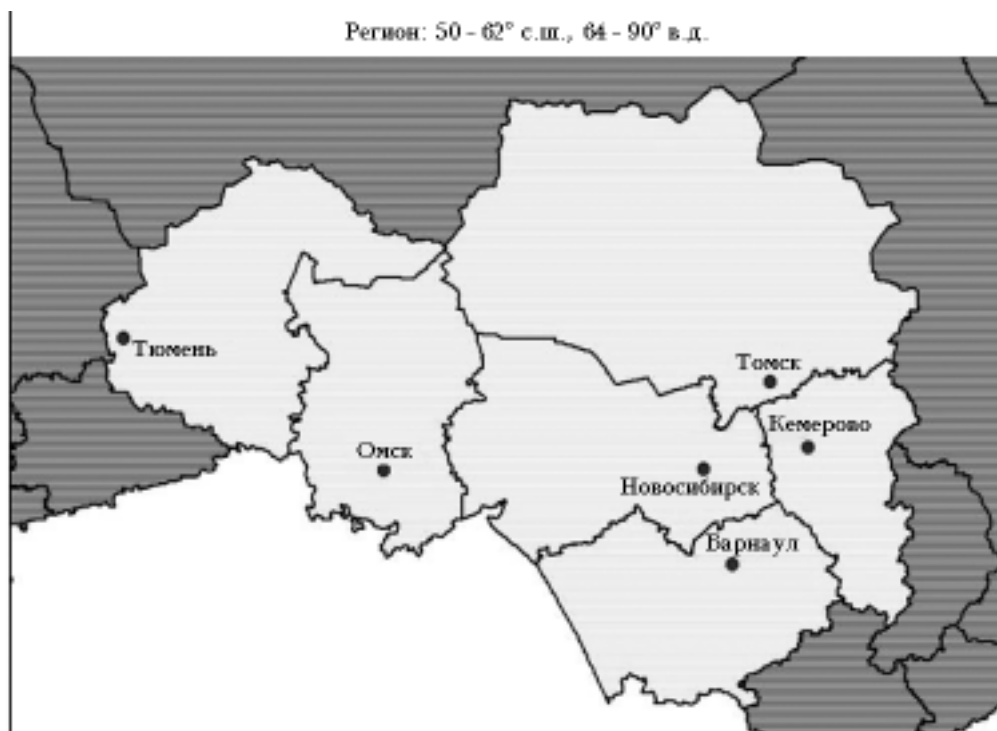


Рис. 1. Карта распределения региональной спутниковой информации

Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В., Кох А.М.

В настоящее время информационное наполнение баз данных представлено двумя типами спутниковой информации:

- архив данных MODIS Atmosphere Products, получаемых через INTERNET;
- архив спутниковой информации NOAA, содержащий данные измерений приборов AVHRR и ATOVS.

Программный блок комплекса разрабатывается на основе как общеизвестных, так и оригинальных программных средств обработки спутниковых данных. Используемое нами программное обеспечение для первичной и тематической обработки результатов измерений радиометра AVHRR было разработано в ИОА СО РАН. Для первичной и тематической обработки данных ATOVS были адаптированы для PC-платформы пакеты AAPP и ICI.

## 1. Информационная основа баз данных

### 1.1. Данные MODIS Atmosphere Products

Данные MODIS Atmosphere Products являются результатами восстановления оптических и метеорологических параметров атмосферы по измерениям прибора MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), который установлен на спутниках TERRA и AQUA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Этот прибор проводит глобальные измерения в тридцати шести спектральных каналах (0,405–14,385 мкм) с пространственным разрешением 1000, 500 и 250 м. Потребители информации могут получать данные первичной обработки измерений различного уровня и результаты их тематической обработки: вертикальные профили атмосферы, характеристики аэрозоля, общее содержание водяного пара и озона, характеристики облачности, темпера-

туру подстилающей поверхности, коэффициенты отражения поверхности, индексы вегетации и т.п.

При формировании базы данных спутниковой информации MODIS в качестве источника данных мы ориентировались на архивы подразделения NASA Goddard Distributed Active Archive Center (DAAC), из которых данные предоставляются бесплатно, могут быть заказаны по INTERNET, получены либо по почте на магнитных носителях, либо по ftp-протоколу с использованием сетевых коммуникаций. На первом этапе были определены три ключевых типа данных MODIS Atmosphere Products:

- 1) MOD04 – характеристики аэрозоля;
- 2) MOD05 – интегральное содержание водяного пара в атмосфере;
- 3) MOD07 – вертикальные профили геопотенциала, температуры и влажности атмосферы. Данные MODIS Atmosphere Products сформированы в файлы (гранулы), краткое описание которых приведено в табл. 1.

Наряду с перечисленными в таблице основными характеристиками гранулы включают геолокационные и временные параметры, параметры геометрии наблюдений, характеристики положения Солнца, маски облачности, характеристики качества восстановленных параметров.

### 1.2. Данные NOAA

В настоящее время на спутниках NOAA установлено два комплекса измерительной аппаратуры:

- 1) радиометр AVHRR для мониторинга из космоса параметров подстилающей поверхности и облачности в пяти каналах видимого и ИК-диапазонов спектра (пространственное разрешение в надире FOV = 1 км);
- 2) приборы вертикального зондирования атмосферы ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder).

Таблица 1

Краткое описание данных MODIS Atmosphere Products

Тип данных	Пространственное разрешение, км	Основные параметры	Среднее кол-во гранул в сутки (для региона)	Размер гранулы, Мбайт	Объем данных за 2000–2003 гг., Гбайт
MOD04	10×10	<i>тип аэрозоля; аэрозольная оптическая толщина (<math>\lambda = 0,47; 0,55</math> и <math>0,66</math> мкм); показатель Ангстрема; массовая концентрация</i>	6	11	96
MOD05	1×1	<i>интегральное влагосодержание</i>	9	20	236
MOD07	5×5	<i>поверхность: температура, давление</i> <i>вертикальные профили: геопотенциал, температура, температура точки росы; интегральное содержание озона, интегральное влагосодержание</i>	9	30	378

Основное назначение аппаратуры ATOVS — получение глобальных и региональных данных о вертикальных профилях геопотенциала, температуры и влажности атмосферы, общего содержания водяного пара и озона. Аппаратура ATOVS включает 20-канальный ИК-радиометр HIRS/3 (FOV = 19 км), 15-канальный СВЧ-радиометр AMSU-A (FOV = 48 км), 5-канальный СВЧ-радиометр AMSU-B (FOV = 16 км).

В Институте оптики атмосферы СО РАН с 1998 г. работает российская станция приема цифровой спутниковой информации NOAA, созданная ИТЦ «СканЭкс» (<http://www.scanex.ru/>). Данные NOAA записываются в формате приемной станции SCANEX/RAW. Файл имеет размер порядка 70 Мбайт и состоит из заголовка и данных телеметрии, содержащих результаты измерений AVHRR и ATOVS, служебные данные бортового процессора. Данные телеметрии записываются как битовый поток сразу за заголовком — кадр за кадром (здесь итеется в виду «малый кадр» — HRPT minor frame [8]).

В результате работы станции для территории Западной Сибири накоплен архив спутниковых измерений AVHRR и ATOVS, объем которого в настоящий момент составляет порядка 600 Гбайт информации.

## 2. Базовое программное обеспечение

### 2.1 Программные средства обработки информации MODIS

Данные спутниковых измерений MODIS записаны в формате HDF-EOS 2 /Hierarchical Data Format for storing data from the Earth Observing System (EOS)/. Формат HDF-EOS и базовое программное обеспечение (ПО) для хранения и обработки информации в этом формате были созданы в National Center for Supercomputing Application's (NCSA), University of Illinois, Urbana-Champaign (<http://hdf.ncsa.uiuc.edu/index.html>). Программное обеспечение представляет собой библиотеку функций для создания, обеспечения доступа и обработки основных структур формата HDF-EOS, интерфейс которой реализован на языках C и FORTRAN.

Для записи, чтения, анализа и визуализации данных в формате HDF-EOS фирмами-разработчиками программного обеспечения в области дистанционного зондирования, а также различными научными группами и отдельными учеными создано как коммерческое, так и свободно распространяемое ПО. Основная особенность использования упомянутого выше ПО заключается в том, что оно предназначено для работы в операционной системе UNIX на 64 разрядных рабочих станциях Sun, IBM, Alpha, SGI и т.д. Однако в большинстве российских центров приема спутниковой информации основу вычислительных средств составляют PC. Это обстоятельство ограничивает применение большинства мощных программных пакетов, предназна-

ченных для обработки мультиспектральных и гиперспектральных снимков.

Для обработки данных MODIS нами используются следующие общеизвестные программные продукты, работающие на PC-платформе в операционной системе Windows:

- ENVI (the Environment for Visualizing Images);
- HDF Explorer Lite;
- Multispec;
- hdfs2bin.pro.

Для проведения валидации и статистического анализа данных MODIS Atmosphere Products нами было разработано программное обеспечение (MODIS-AP), которое выполняет следующие функции:

- 1) чтение гранул и выбор массивов восстановленных атмосферных параметров и массивов параметров геометрии наблюдения;
- 2) отбор значений восстановленных атмосферных параметров, соответствующих заданному уровню качества;
- 3) отбор данных для заданной пространственной области;
- 4) сравнительный анализ согласованных по времени спутниковых и наземных измерений оптических и метеорологических характеристик атмосферы (валидация спутниковой информации);
- 5) статистический анализ пространственной и временной изменчивости данных в заданном регионе.

При выполнении п. 2 мы столкнулись с расхождениями для каждого типа файлов содержащейся в них информации и спецификаций. В частности, значение Fill Value может не совпадать с заданным значением. Кроме того, может нарушаться соответствие между значениями восстанавливаемых параметров и характеристиками качества восстановления (Quality Assurance Flags).

Примеры результатов валидации и статистического анализа данных MOD04 (Level 2) и MOD05 (Level 2) для Томского региона за 2002 г. (май—сентябрь) приведены на рис. 2 и 3. Для валидации спутниковых данных были использованы данные фотометрических измерений спектральной аэрозольной оптической толщины и общего влагосодержания атмосферы, регулярно проводимых в ИОА СО РАН [9].

Анализ данных, приведенных на рис. 2, позволяет сделать основной вывод о хорошей корреляции между данными MODIS и данными наземных фотометрических измерений.

При анализе данных о пространственном распределении аэрозольной оптической толщины (АОТ) за 2001–2002 гг. для Томского региона (рис. 3) следует обратить внимание на следующий факт. Несмотря на квазиоднородность (в пределах  $\pm 0,05$ ) этих распределений, они имеют сходную структуру. При этом коэффициент корреляции между данными 2001 и 2002 гг. достаточно высок —  $R = 0,70$ . В дальнейшем мы планируем исследовать причину этого факта.

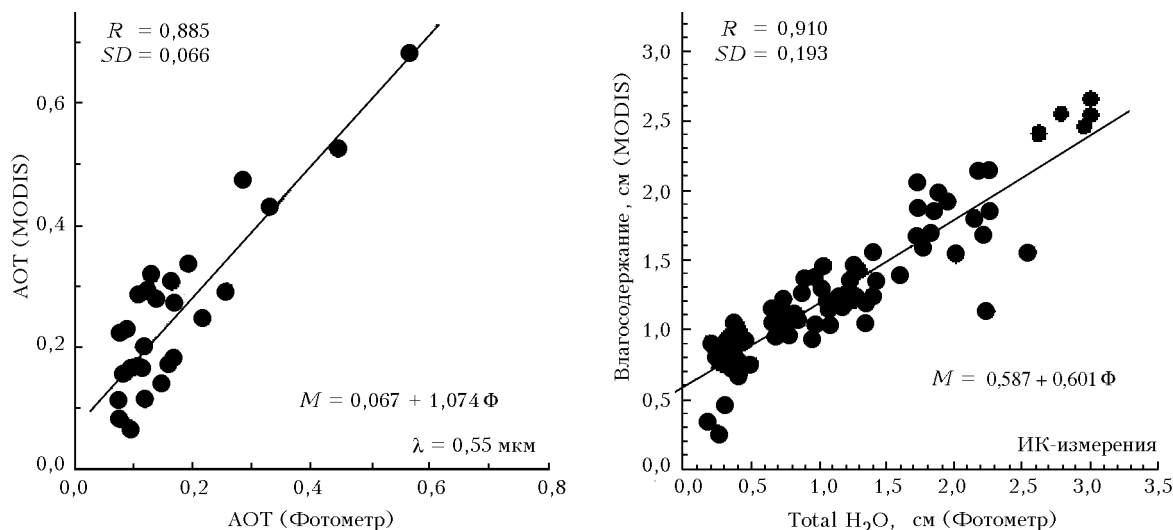


Рис. 2. Результаты валидации данных MOD04 и MOD05 (Level 2); Томский регион, май–сентябрь 2002 г.

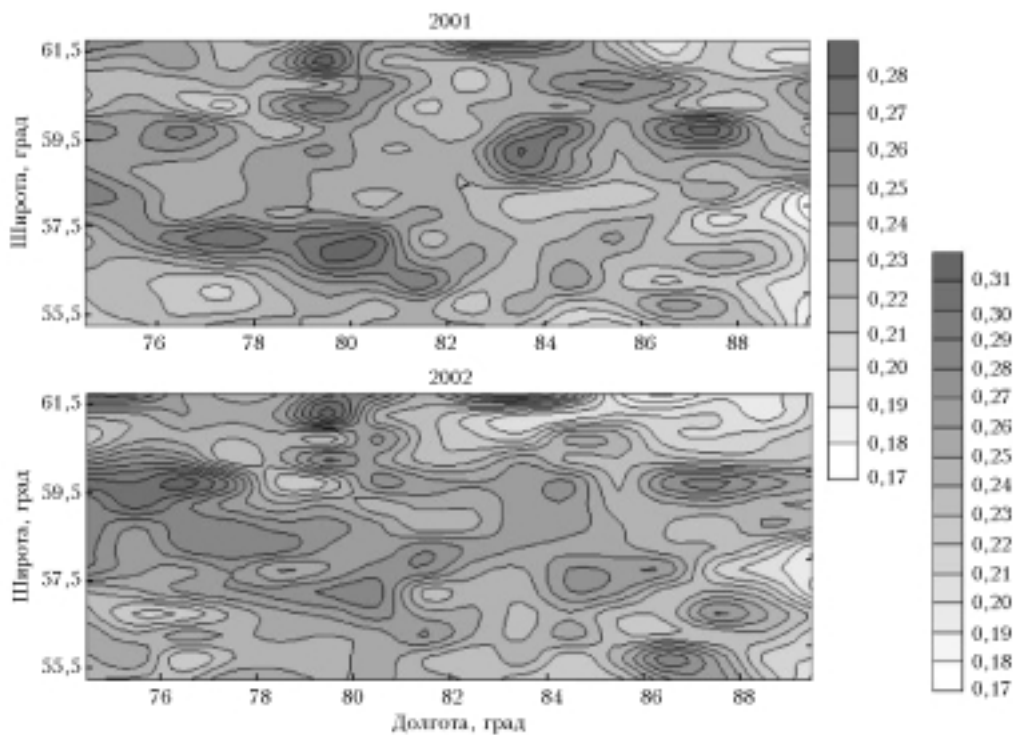


Рис. 3. Пространственное распределение для Томского региона усредненной по времени АОТ ( $\lambda = 0,55$  мкм)

## 2.2. Программные средства обработки информации NOAA/AVHRR

Разработанное в ИОА СО РАН программное обеспечение для первичной и тематической обработки результатов измерений радиометра AVHRR выполняет следующие основные функции:

- чтение файлов спутниковой цифровой телеметрической информации, ее декоммутацию;
- расчет калибровочных коэффициентов для ИК-каналов AVHRR;
- калибровку спутниковых измерений AVHRR, пересчет их в альbedo (каналы № 1, 2, 3а) и яркие температуры (каналы № 3, 4, 5);

- анализ качества спутниковых измерений; автоматический поиск и отбраковку «сбойных» сканов и «сбойных» пикселей;

- географическую привязку снимков на основе библиотеки SGP4 и файлов орбитальных данных формата TLE-NORAD;

- линейную интерактивную коррекцию расчетной географической привязки снимков на основе совокупности реперных точек и контурных линий;

- обработку временного ряда малооблачных спутниковых снимков и получение для заданной территории пространственного распределения альbedo подстилающей поверхности в каналах 1 и 2 AVHRR (видимая область спектра);

- восстановление аэрозольной оптической толщины в каналах 1 и 2 AVHRR и получение пространственного распределения аэрозольной оптической толщины;
- получение файла пространственного распределения облачности на спутниковом снимке;
- обнаружение высокотемпературных аномалий на поверхности с помощью спутниковых измерений с учетом оптико-метеорологического состояния атмосферы и геометрических условий наблюдений.

Иллюстрации применения на практике этого программного обеспечения представлены в работах [10–12].

### 2.3. Программные средства обработки информации NOAA/ATOVS

Для предварительной обработки данных ATOVS за рубежом в настоящее время широко используется пакет программ AAPP (ATOVS and AVHRR Processing Package), разработанный Meteo France при содействии EUMETSAT (<http://www.eumetsat.de/en/area4/aapp/index.html>). Для тематической обработки данных ATOVS (восстановления вертикальных профилей атмосферы) в настоящее время, как правило, используется один из двух вариантов – пакет ICI (Inversion Coupled with Imager), разработанный в Meteo France (<http://www.meteorologie.eu.org/ici/index.html>), или пакет IAPP (International ATOVS Processing Package), разработанный в CIMSS (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies) University of Wisconsin-Madison (<http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/IAPP.html>).

Как и в случае с файлами типа HDF-EOS, пакеты предварительной и тематической обработки данных ATOVS предназначены для работы в операционной системе UNIX на 64 разрядных рабочих станциях. Как уже было замечено, в большинстве российских центров приема спутниковой информации вычислительная техника в основном представлена РС. Таким образом, для обработки данных ATOVS в российских условиях требуются либо разработка собственного программного обеспечения, либо применение адаптированных РС-версий пакетов AAPP, ICI, IAPP. В настоящее время нам неизвестны зарубежные или российские организации, которые занимаются разработкой и распространением РС-версий пакетов предварительной и тематической обработки данных ATOVS. В российской научной литературе мы встретили лишь несколько публикаций [13, 14] о результатах использования адаптированных РС-версий пакетов AAPP и IAPP в НИЦ космической гидрометеорологии «Планета» (г. Москва). Все перечисленные выше обстоятельства стали основанием для разработки в Институте оптики атмосферы СО РАН адаптированных для РС-платформы версий пакетов AAPP и ICI.

Пакет AAPP предназначен для выполнения предварительной обработки HRPT данных, основным результатом работы пакета является L1d-файл, который на втором этапе используется программой ICI или IAPP.

Обработка данных формата HRPT делится на 4 основных блока: 1) декоммутация, 2) географическая привязка, 3) калибровка и 4) создание облачной «маски». Этапы работы представлены на блок-схеме (рис. 4).

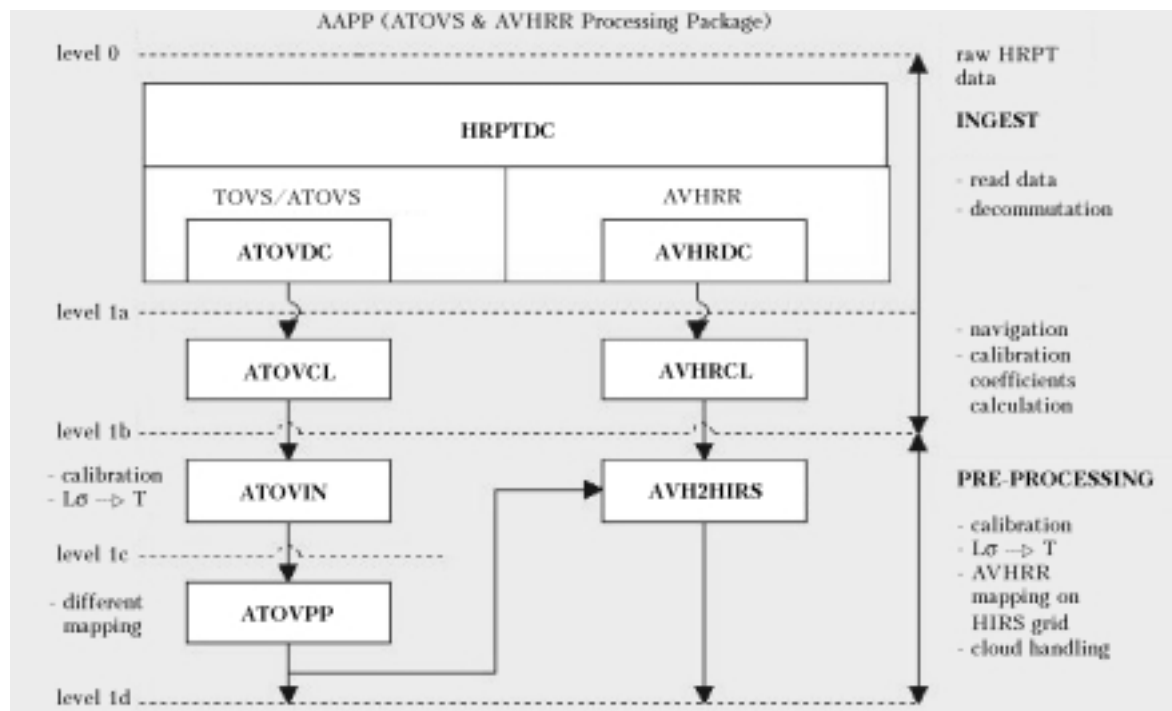


Рис. 4. Блок-схема работы пакета AAPP

В процессе работы пакета создаются рабочие файлы форматов L1a, L1b, L1c. На завершающем этапе работы пакета создается облачная маска и файл формата L1d.

Для использования на PC нами был адаптирован пакет AAPP v3.5 с использованием компилятора FORTRAN g77 и операционной системы Linux. Результаты верификации PC-версии пакета AAPP v3.5 показали хорошее совпадение с тестовыми данными файлов всех форматов (L1a, L1b, L1c, L1d).

Пакет ICI осуществляет обработку L1d-файлов, полученных в результате работы AAPP, с целью восстановления вертикальных профилей атмосферных параметров (геопотенциал, температура и влажность) на 40 высотных уровнях от 1000 до 0,1 гПа. Общая схема работы ICI представлена на блок-схеме (рис. 5).

Результатом работы ICI является бинарный файл, содержащий результаты восстановления вертикальных профилей и интегральных характеристик содержания водяного пара и озона в атмосфере.

Для работы на PC нами был адаптирован пакет ICI v3.0 с использованием компилятора Intel Fortran 8.0 и операционной системы Linux. Верификация PC-версии осуществлялась на основе прилагаемых к кодам ICI v3.0 тестовых данных, включающих результаты восстановления 8676 вертикальных профилей атмосферы в географическом регионе 20–75° с.ш. и 50° з.д.–50° в.д. по данным 6 спутниковых снимков NOAA-16 за 30.03.2001.

В табл. 2 для каждого снимка приведены следующие параметры:

- время проведения измерений (GMT);
- общее количество профилей и число восстановленных профилей, не совпадающих с тестовыми данными;
- статистические характеристики (среднее и СКО) абсолютной разницы данных для профилей температуры;
- статистические характеристики (среднее и СКО) относительной разницы данных для профилей влажности.

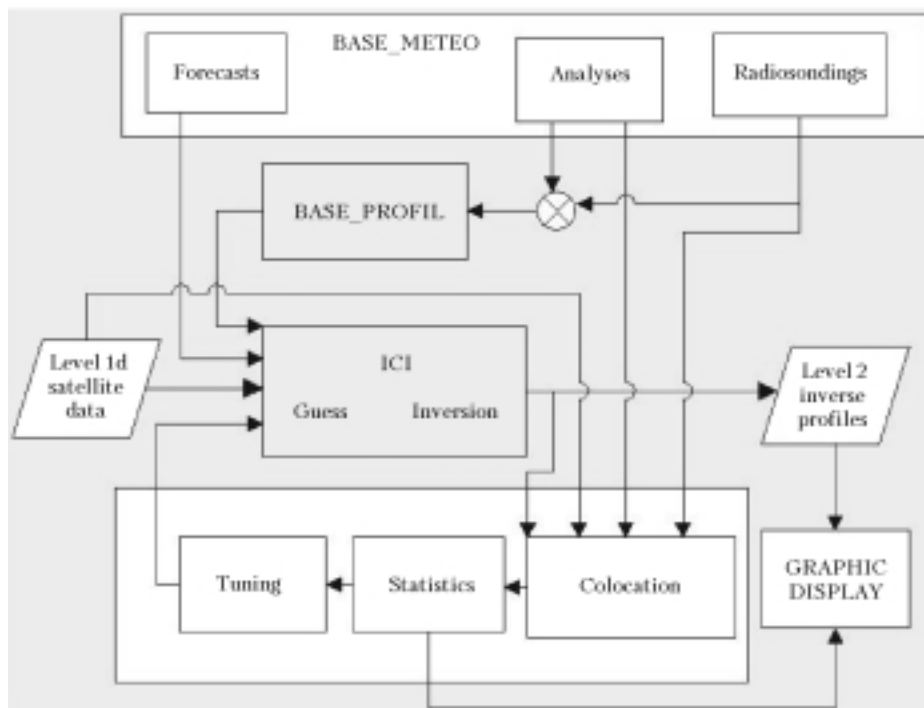


Рис. 5. Блок-схема работы пакета ICI

Таблица 2

Результаты верификации PC-версии пакета ICI v3.0

Время (GMT)	Количество профилей	Температура, К	Влажность, %
01:05	1285 / 2	–0,001; 0,026	0,019; 0,742
02:46	1680 / 4	0,000; 0,046	0,000; 0,677
04:27	1259 / 3	0,000; 0,031	–0,025; 1,400
10:59	1008 / 6	0,000; 0,037	–0,010; 0,749
12:35	1708 / 8	–0,001; 0,064	–0,003; 1,829
14:47	1736 / 9	0,001; 0,073	–0,003; 1,477

Из табл. 2 следует, что верификация РС-версии ICI v3.0 показала хорошее совпадение результатов восстановления вертикальных профилей атмосферы с тестовыми данными.

Пример результатов обработки данных NOAA/ATOVS для Томского региона с помощью РС-версии пакетов AAPP&ICI приведен на рис. 6.

В процессе реализации РС-версий пакетов AAPP и ICI для работы с данными российских станций приема спутниковой информации решались проблемы различного представления данных на рабочих станциях (Sun, IBM, Alpha, SGI) и PC, а также учета особенностей форматов данных для различных станций приема спутниковой информации. Наряду с этими задачами актуальной стала проблема эксплуатации пакетов при наличии на спутниковом снимке «сбойных» сканов, вызванных

снижением качества приема спутниковой информации или нарушениями в работе спутникового оборудования. Следствие данной проблемы – нестабильная или некорректная работа AAPP, когда в случае превышения некоторого количества «сбойных» сканов (~ 50–100) прекращается обработка информации на этапе декоммутации или калибровки спутниковых измерений.

Для решения этой проблемы было разработано Windows-приложение HRQuality, предоставляющее пользователю информацию о количестве «сбойных» сканов и их распределении по снимку. Помимо этого пользователю дается возможность удаления (обрезки) «сбойных» сканов по краям снимка. Далее приложение осуществляет конвертацию файлов спутниковой информации во входной формат данных программы AAPP.

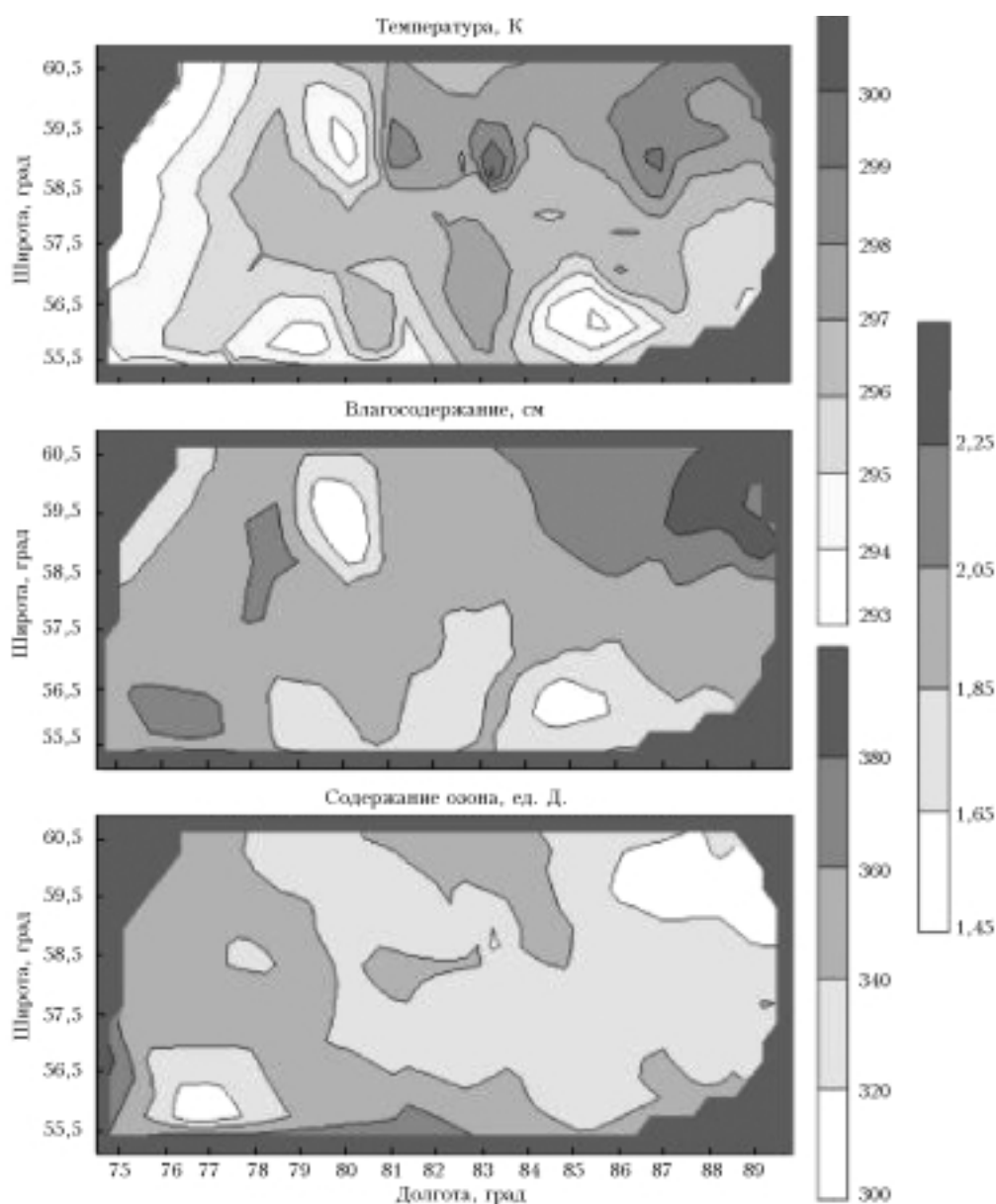


Рис. 6. Пример результатов обработки данных ATOVS/NOAA-17 для Томского региона (24.06.2003, время – 04:56 GMT)



Рис. 7. Изображение главного окна программы HRPQuality

В главном окне отображаются график, а также два маркера для указания количества обрезаемых строк с начала (левый маркер) и с конца файла (правый маркер), а также кнопки открытия и сохранения файлов, закрытия приложения, сброса позиций маркеров и изменения масштаба графика. Изображение главного окна программы представлено на рис. 7.

Данные, использованные в этой работе, получены в рамках инициативы NASA's Earth Science Enterprise. Алгоритмы разработаны MODIS Science Teams. Данные, прошедшие обработку в MODIS Adaptive Processing System (MODAPS) и Goddard Distributed Active Archive Center (DAAC), архивируются и распространяются Goddard DAAC.

Авторы выражают искреннюю признательность Владимиру Степановичу Соловьеву (ИКФИА СО РАН) за помощь в работе с пакетами AAPP и ICI.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 04-07-90018).

1. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В.* Создание информационно-программного комплекса по обработке региональной спутниковой информации // Междунар. конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»: Сб. материалов. Усть-Каменогорск: Изд-во ВКГУ, 2003. Ч. 1. С. 59–64.
2. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В., Кох А.М.* Валидация региональных спутниковых данных

MODIS Aerosol Product (MOD04): Тезисы докл. // Вторая Всерос. конф. «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы космическими средствами». СПб.: Изд-во РГГМУ, 2004. Т. 2. С. 27–31.

3. *Afonin S.V., Engel' M.V.* Development of databases of regional satellite information about environmental parameters // Abstracts of Reports at XIth Joint Intern. Sympos. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2004. P. 107.
4. *Afonin S.V., Solomatov D.V.* Statistical processing of MODIS satellite data (MOD05, level 2) for the Tomsk region // Abstracts of Reports at XIth Joint Intern. Sympos. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2004. P. 106.
5. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В.* Структура информационно-программной системы для компьютерного моделирования задач регионального мониторинга лесных пожаров из космоса: Тезисы докл. // Междунар. конф. «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии». Томск: Изд-во ТГУ, 2004. С. 23–27.
6. *Кох А.М., Афонин С.В., Белов В.В.* PC-версия программ AAPP&ICI для обработки спутниковых данных NOAA/ATOVS: Тезисы докл. // Междунар. конф. по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2004. Томск, июль, 2004. С. 60–61.
7. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В., Кох А.М., Соломатов Д.В.* Коллекция спутниковых данных MODIS Atmosphere Products для Западно-Сибирского региона: Тезисы докл. // IV Междунар. симпоз.



- «Контроль и реабилитация окружающей среды». Томск, июль, 2004. С. 65–66.
8. NOAA/NESDIS Technical Memorandum NESS 107.
  9. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Туршинович С.А.* Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1132–1169.
  10. *Афонин С.В., Белов В.В., Гриднев Ю.В.* Система космомониторинга лесных пожаров на территории Томской области. Часть 1. Организация системы космомониторинга // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 996–1004.
  11. *Афонин С.В., Белов В.В.* Система космомониторинга лесных пожаров на территории Томской области. Часть 2. Оценка эффективности космомониторинга // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 8. С. 692–696.
  12. *Афонин С.В., Белов В.В.* Информационно-методические основы построения эффективных систем спутникового мониторинга лесных пожаров // Вычисл. техн. 2003. Т. 8. Спецвыпуск. С. 35–46.
  13. *Соловьев В.И., Успенский А.Б., Кухарский А.В.* Температурно-влажностное зондирование атмосферы регионального покрытия по данным ИСЗ «NOAA-16». // Метеорол. и гидрол. 2002. № 2. С. 52–63.
  14. *Соловьев В.И., Успенский А.Б., Кухарский А.В.* Опыт регионального температурно-влажностного зондирования атмосферы по данным ИСЗ «NOAA» // Метеорол. и гидрол. 2003. № 3. С. 38–46.

*S.V. Afonin, V.V. Belov, M.V. Engel', A.M. Koxh.* **Development of a database of regional satellite information and software for processing of this information in the Institute of Atmospheric Optics SB RAS.**

This paper presents the general description of the information-software system developed in the Institute of Atmospheric Optics (IAO) SB RAS based on the archives of regional digital satellite (MODIS, NOAA) information and the software for primary and thematic processing of this information. The system to be developed is intended for solution of a wide range of problems concerning remote sensing of atmospheric and surface parameters from space, as well as for investigation of the spatial and temporal variability of the environment in Western Siberia. The program block of the system is based on both commonly known and original, developed in the IAO, software for processing of satellite data.