

Программное обеспечение информационно-вычислительной системы расчета данных для проведения атмосферной коррекции спутниковых изображений

М.В. Энгель, С.В. Афонин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 27.03.2014 г.

Дано описание программного обеспечения информационно-вычислительной системы атмосферной коррекции спутниковых изображений, позволяющей проводить расчеты в автоматическом режиме с использованием распределенных данных. В качестве информации о состоянии атмосферы определены два типа данных: прогностические модели и результаты спутниковых измерений. Для оценки релевантности спутниковых метеоданных разработан метод прогнозирования достоверности результатов расчета. Система предоставляет возможность проведения атмосферной коррекции для широкого диапазона популярных спутниковых приборов при многообразных атмосферных метеоусловиях и сочетании различных искажающих факторов.

Ключевые слова: информационно-вычислительная система, атмосферная коррекция, спутниковые данные; computing system, atmospheric correction, satellite data.

Введение

Для эффективного использования данных дистанционного зондирования (ДЗ) создаются прикладные системы, предназначенные для решения различных тематических задач. При создании таких систем должен быть решен вопрос о необходимости процедуры атмосферной коррекции (АК), так как наблюдение поверхности из космоса производится через атмосферу — многокомпонентную среду, состоящую из атмосферных газов, аэрозолей, облачности, искажающих результаты дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Например, АК является необходимым условием достижения максимальной точности решения таких тематических задач, как восстановление температуры земной поверхности, детектирование очагов горения, идентификация типов поверхности и т.д.

Наиболее точная коррекция искажающих факторов атмосферы возможна на основе многофакторного физического подхода (МФП), где используется теория переноса оптического излучения земной поверхности через многокомпонентную среду совместно с оперативной информацией о параметрах оптико-метеорологического состояния атмосферы в момент проведения ДЗЗ из космоса [1–5]. Однако применение МФП является безусловно нетривиальной задачей, и реализация соответствующего программного обеспечения в центрах приема и обработки спутниковых данных потребует определенных временных и финансовых затрат, достаточного объема специальных знаний, решения ряда организационных вопросов.

Путь решения данной проблемы видится в возможности использования высокоточной радиационной модели атмосферы и данных о состоянии атмосферы, полученных из распределенных электронных архивов. Этот подход положен в основу разработки автоматизированной информационно-вычислительной системы (АИВС) расчета данных для проведения атмосферной коррекции спутниковых изображений. Такая система в настоящий момент разрабатывается в ИОА СО РАН и будет ориентирована на обработку данных спутниковой аппаратуры EOS/MODIS, NOAA/POES, SPOT, LANDSAT, а в перспективе данных и других спутниковых систем.

Источники оптико-метеорологической информации

Одним из ключевых вопросов проведения АК является выбор источников оптико-метеорологических данных об атмосфере оптимального объема, требуемой точности и пространственного разрешения, позволяющих осуществлять атмосферную коррекцию всего спутникового изображения.

Современные спутниковые методы диагностики аэрозоля и облачности позволяют снять вопрос об оперативности данных и обеспечить относительно высокое пространственное разрешение восстанов-

* Марина Владимировна Энгель (angel@iao.ru);

Сергей Васильевич Афонин.

ленных данных. Мы остановились на информации системы EOS/MODIS по следующим причинам:

1) измерения имеют глобальный характер и проводятся несколько раз в сутки;

2) пространственное разрешение данных и их точность удовлетворяют требованиям проведения атмосферной коррекции;

3) предоставлен оперативный доступ к данным.

Для проведения атмосферной коррекции интегрес представляют следующие тематические продукты MODIS, содержащие восстановленные данные об атмосферных параметрах [6]:

– MxD35_L2 – облачная маска (номинальное (при измерении в надир) разрешение 1 км);

– MxD04_L2 – параметры аэрозоля (10 км);

– MxD06_L2 – параметры облачности (1 и 5 км);

– MxD07_L2 – профили температуры и водяного пара (5 км).

Префикс для продуктов, полученных на основе данных спутника Terra, – MOD, Aqua – MYD. Аббревиатура L2 указывает на то, что тематические продукты относятся ко второму уровню обработки спутниковых данных, т.е. содержат восстановленные характеристики атмосферы, географически привязанные к точкам измерений на поверхности Земли.

Данные MxD35_L2 позволяют исключать из расчета точки, на которые приходится оптически плотная облачность. Данные MxD04_L2 для АК содержат ключевые значения аэрозольной оптической толщи, а данные MxD06_L2 – различные параметры облачности. При проведении атмосферной коррекции особый интерес представляют высота облачности, ее оптическая толщина и маска перистости облачности. Данные MxD07_L2 включают вертикальные профили температуры и содержания водяного пара.

Существует множество электронных архивов, содержащих продукты на основе измерений системы EOS/MODIS [7], что позволяет включать их в сценарии автоматической обработки спутниковых данных в качестве источников спутниковой информации об атмосферных параметрах.

Для использования данных в качестве информации о состоянии атмосферы в сценариях автоматической обработки необходимо, чтобы распределенные хранилища отвечали следующим требованиям:

– наличие метаданных, обеспечивающих возможность поиска спутниковых данных в соответствии с заданными критериями,

– использование унифицированного формата для записи данных,

– доступ к хранилищам по сетевым протоколам.

В результате проведенного анализа источников спутниковой информации сделан вывод, что в настоящее время для этих целей наиболее полезен ресурс LAADS Web (the Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System – LAADS Web), Goddard Space Flight Center, NASA [8]. Тематические продукты, содержащие атмосферные параметры, представлены в архивах LAADS Web за весь период измерений сенсоров MODIS.

В качестве дополнительного источника информации об атмосферных параметрах в системе также предусмотрено использование прогностических моделей. Ресурс LAADS Web предоставляет доступ к прогностическим данным, записанным в формате GRIB.

В состав системы также включен локальный электронный архив спутниковых атмосферных продуктов MODIS для региона Западной Сибири, собранный в ИОА СО РАН. В перспективе планируется получение данных из электронных архивов ЦКП ДДЗ СО РАН [9].

Реализация программного обеспечения системы

При создании АИВС необходимо решить проблему организации вычислительного процесса автоматической обработки распределенных данных. Для этой цели разработана математическая модель, основанная на множестве управляющих конечных автоматов. Автоматы моделируют состояния, в которых может находиться система (рис. 1), а функции их переходов реализуют логику поведения (выбор выполняемых действий, зависящих от текущего состояния и входного воздействия).

Для программной реализации автоматной модели в качестве базовой технологии разработки выбрана технология автоматного программирования (АП) [10]. В соответствии с парадигмой АП система может быть спроектирована в виде множества взаимодействующих автоматизированных объектов управления. Автоматизированный объект управления (АОУ) представляет собой управляющий автомат, интегрированный с управляемой частью в одно устройство.

При проектировании были выделены следующие состояния, в которых может находиться система:

- определение метеоданных для расчетов на основании сформулированного задания;
- получение метеоданных;
- оценка релевантности спутниковых метеоданных;

- проведение расчетов;
- предоставление результатов пользователю;
- аварийное завершение выполнения задания.

Каждое состояние представлено в виде автоматизированного объекта управления. Таким образом, АИВС представляет собой совокупность АОУ, взаимодействующих через общий объект управления системой, логически представляющий собой общую память для записи входных переменных – признаков состояний системы.

Для использования распределенных метеоданных разработана и реализована схема сетевой идентификации источников метеоданных, основанная на наборе формальных признаков, необходимых для получения данных при проведении расчета в автоматическом режиме. Схема включает следующие позиции:

- URL,
- тип данных,
- приоритет,
- сетевой протокол,
- параметры авторизации.

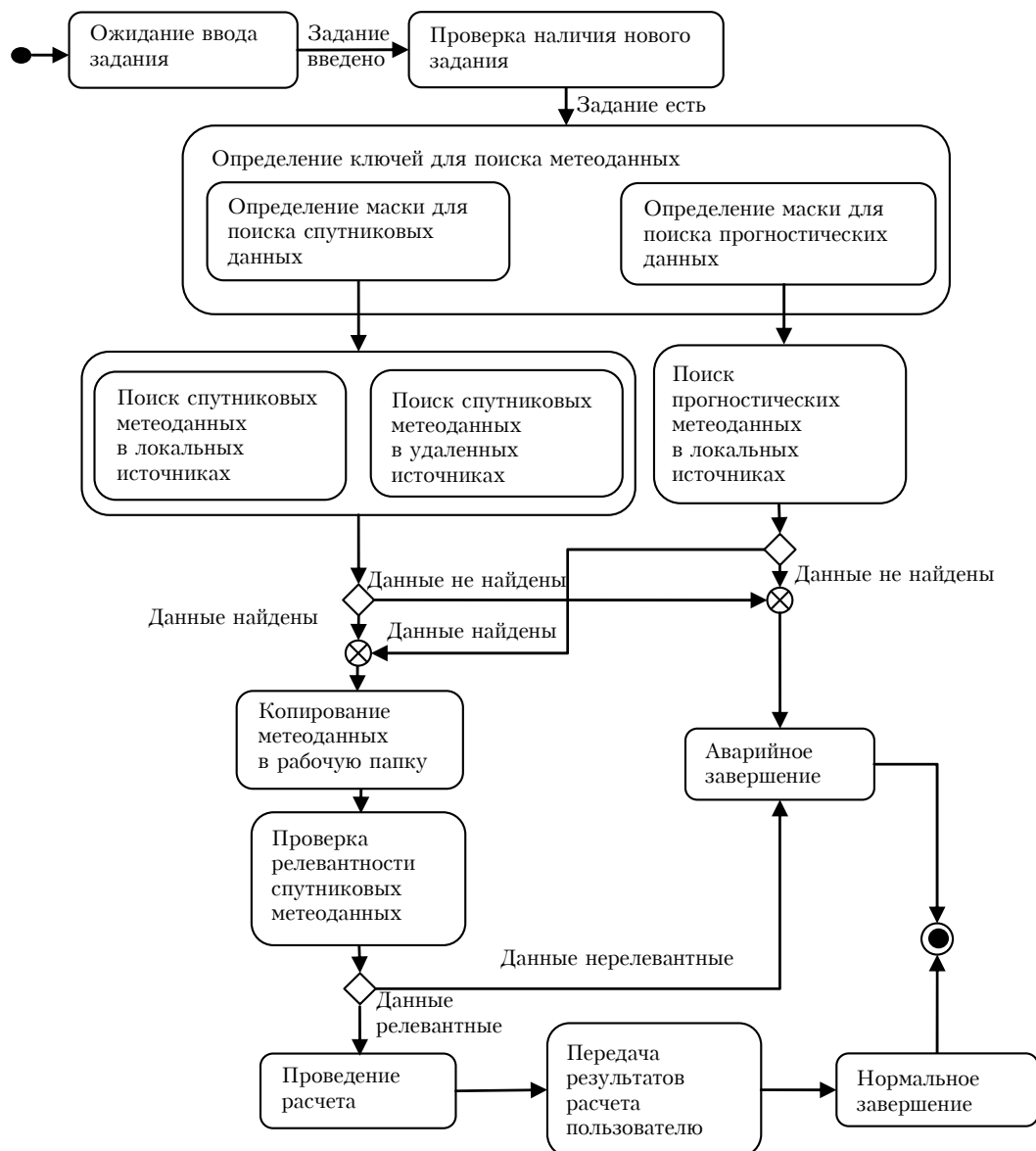


Рис. 1. Диаграмма состояний системы

Одной из краеугольных компонент АИВС является база данных (БД). В разработанной системе БД используется как информационная среда в следующих целях:

- хранение параметров расчета;
- обмен признаками состояний и данными между процессами;
- хранение схемы сетевой идентификации распределенных источников метеоинформации;
- хранение служебной информации.

Архитектура системы

Для АИВС выбрана трехуровневая архитектура, характерная для программных приложений, использующих web-технологии и базы данных. Разработка системы основывается на лицензионно-чистых, открытых (open-source) программных средствах и ведется в среде операционной системы Linux. В качестве базового средства разработки

выбран высокоуровневый язык Python, на котором написаны и реализованы управляющие сценарии АОУ и функциональные модули системы. Web-интерфейс создан на основе фреймворка для web-приложений Django. Расчетные модули системы проведения расчетов написаны на языках C++ и FORTRAN. При создании баз данных использована объектно-реляционная СУБД PostgreSQL.

В качестве модели процесса переноса излучения предлагается использовать программу MODTRAN, хорошо зарекомендовавшую себя при решении задач атмосферной коррекции данных ДЗЗ из космоса.

Оценка релевантности спутниковых метеоданных

Спутниковые данные, содержащие значения атмосферных параметров и используемые для проведения АК, могут содержать ошибки, которые

способны привести к ухудшению точности скорректированных данных. Оценка релевантности спутниковой информации для проведения атмосферной коррекции ДДЗ является необходимым условием использования спутниковых данных в качестве информации о состоянии атмосферы при проведении АК.

Метод оценки релевантности спутниковой метеоинформации MODIS для проведения атмосферной коррекции ДДЗ основан на сравнении температур земной поверхности (ТЗП), восстановленных по результатам одновременных спутниковых измерений в ИК-каналах [11]. Очевидно, что в случае отсутствия ошибок в профилях метеопараметров значения температуры подстилающей поверхности, восстановленные в разных ИК-каналах, будут совпадать. По абсолютному значению разницы восстановленных «спектральных» ТЗП возможно оценить для каждого пикселя спутникового ИК-изображения качество его атмосферной коррекции.

По результатам моделирования, проведенного для оценки «чувствительности» каналов к качеству

спутниковой метеоинформации, для системы EOS/MODIS в качестве реперных выбраны каналы #31 и #32 диапазона 8–13 мкм с эффективными длинами волн $\lambda = 11$ и 12 мкм.

На основе разработанного метода в системе реализован алгоритм оценки релевантности спутниковой метеоинформации MODIS для проведения АК (рис. 2). Все данные, необходимые для работы алгоритма, можно получить из тематического продукта MODIS типа MxD07_L2.

Использование АИВС

Принцип использования АИВС достаточно прост. Пользователь делает запрос на проведение атмосферной коррекции, указывая ключевые атрибуты (временные и пространственные) файла телеметрической информации, для которого проводится АК, и требуемые спектральные каналы. В соответствии с заданными атрибутами производится поиск необходимой оптико-метеорологической информации.

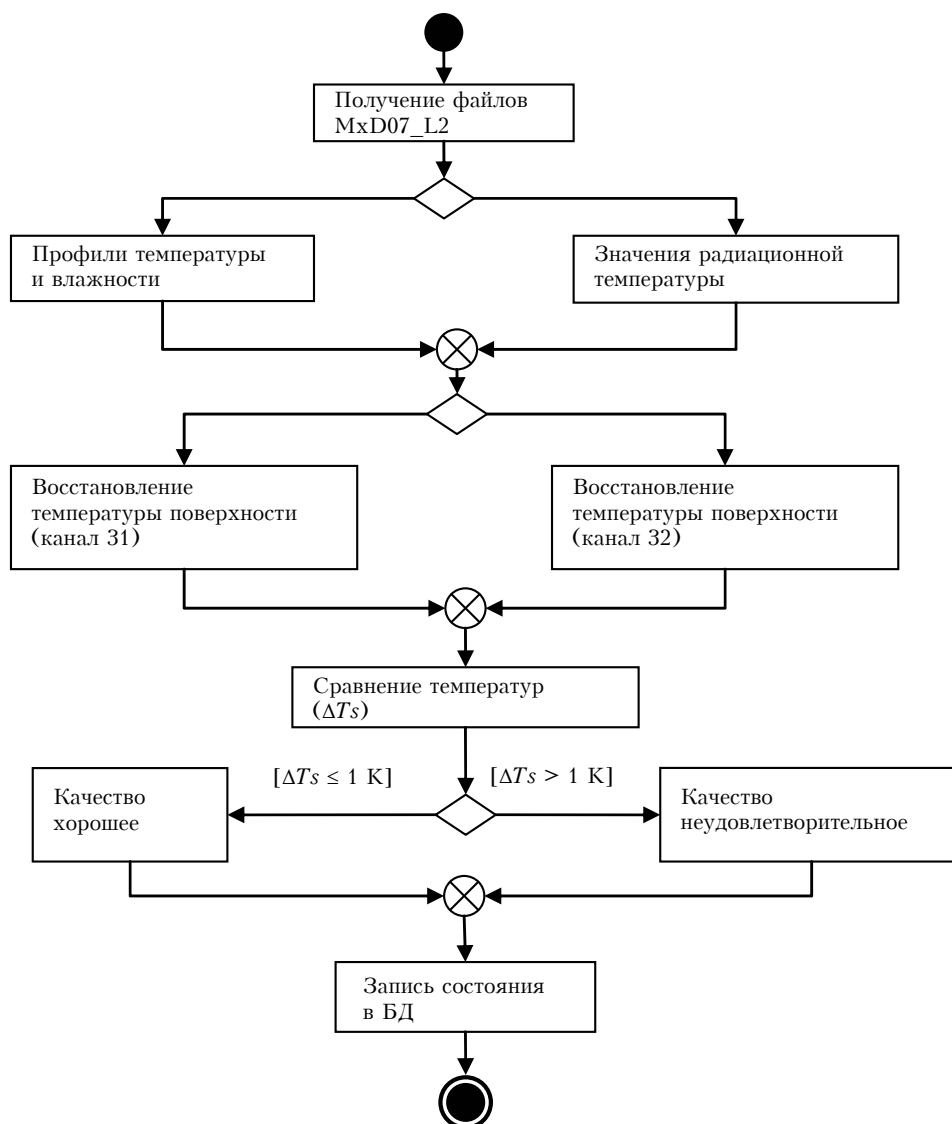


Рис. 2. Алгоритм оценки релевантности спутниковой метеоинформации MODIS

Если требуемых данных в определенных информационных источниках нет, используются прогностические модели атмосферы. Затем для заданного снимка осуществляется расчет требуемых характеристик искажающего влияния атмосферы.

В результате работы системы формируется выходной файл, содержащий вспомогательные данные и характеристики, необходимые непосредственно для проведения АК. Результаты расчета пользователь получает по сети. Фрагмент выходного файла приведен на рис. 3.

lat	lon	trans	PATH	surfEMIT	surfREFL	SOLAR	TOTAL	Wtot	Tz0
deg	deg	-----	Watts/(m2	ster	mic)	-----	g/cm2		К
-4,61	4,663	0,7785	7,18E-02	5,19E-01	2,72E-03	3,15E-02	6,25E-01	2,862	295,65
-4,627	4,773	0,7807	7,03E-02	5,24E-01	2,71E-03	3,16E-02	6,29E-01	2,823	295,72
-4,644	4,881	0,7813	7,07E-02	5,28E-01	2,78E-03	3,16E-02	6,33E-01	2,854	295,64
-4,613	4,541	0,7755	7,23E-02	5,19E-01	2,86E-03	3,13E-02	6,25E-01	2,816	295,63
-4,631	4,653	0,7785	7,19E-02	5,22E-01	2,73E-03	3,15E-02	6,28E-01	2,874	295,66
-4,648	4,762	0,7799	7,06E-02	5,26E-01	2,76E-03	3,15E-02	6,31E-01	2,847	295,69
-4,665	4,87	0,7804	7,13E-02	5,33E-01	2,84E-03	3,16E-02	6,38E-01	2,876	295,61
-4,682	4,975	0,7832	7,04E-02	5,30E-01	2,76E-03	3,17E-02	6,34E-01	2,881	295,74
-4,699	5,079	0,7853	6,94E-02	5,31E-01	2,74E-03	3,18E-02	6,35E-01	2,807	295,58
-4,715	5,18	0,7876	6,87E-02	5,29E-01	2,67E-03	3,20E-02	6,32E-01	2,765	295,83
-4,731	5,28	0,7898	6,77E-02	5,31E-01	2,66E-03	3,21E-02	6,33E-01	2,764	295,56
-4,747	5,377	0,7912	6,77E-02	5,27E-01	2,65E-03	3,22E-02	6,29E-01	2,826	295,75

Рис. 3. Фрагмент выходного файла

Характеристики атмосферы, используемые для проведения АК, включают:

- функцию пропускания атмосферы в слое атмосферы между подстилающей поверхностью и высотным уровнем (trans);
- вклад собственного излучения атмосферы (PATH);
- вклад ослабленного атмосферой излучения поверхности (surfEMIT);
- вклад отраженного от поверхности излучения атмосферы и Солнца (surfREFL);
- интенсивность Солнца (SOLAR);
- суммарное излучение (TOTAL).

Данные расчетов «привязываются» к географическим координатам. Вспомогательные данные включают геометрические и оптические параметры наблюдения, значения аэрозольной оптической толщи, общего влагосодержания, температуры приземного слоя, а также относительное содержание облачности.

Заключение

Разработано и проходит тестирование программное обеспечение АИВС для проведения атмосферной коррекции спутниковых изображений земной поверхности. В настоящее время система по-

зволяет производить обработку данных ИК-каналов спутниковой аппаратуры EOS/MODIS, NOAA/POES, SPOT, LANDSAT с использованием спутниковой информации EOS/MODIS о состоянии атмосферы, а также прогностических моделей из распределенных источников. В дальнейшем предполагается развитие АИВС в направлении получения расчетных данных для проведения АК в спектральных каналах диапазона от 0,4–2,1 мкм; расширения типов спутниковой метеоинформации за счет данных системы VIIRS/NPP.

1. *Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В.* Разработка программного обеспечения для атмосферной коррекции аэрокосмических ИК-измерений температуры подстилающей поверхности. // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19, № 1. С. 69–76.
2. *Афонин С.В., Соломатов Д.В.* Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 2. С. 147–153.
3. *Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В.* Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 12. С. 1056–1063.
4. *Соломатов Д.В.* Алгоритмы и программные средства атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений на основе RTM-метода: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Томск, 2010. 21 с.
5. *Афонин С.В.* Результаты тестирования двух методов атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений температуры земной поверхности // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 4. С. 308–310.
6. *Афонин С.В.* К вопросу о применимости восстановленных из космоса метеоданных MODIS для атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 8. С. 684–690.

7. *EOSDIS* Data Centers. 2006. URL: <https://earthdata.nasa.gov/about-eosdis/system-description/eosdis-data-centers-daacs> (дата обращения: 21.03.2014).
8. *LAADS* Web – Level 1 and Atmosphere Archive and Distributiion System. 2007. URL: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/index.html> (дата обращения: 01.03.2014).
9. *Шокин Ю.И., Добрецов Н.Н., Кихтенко В.А., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л., Чубаров Л.Б.* О распределенной инфраструктуре системы оперативного спутникового мониторинга ЦКП ДДЗ СО РАН // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, спец. выпуск. С. 79–87.
10. *Поликарпова Н.И., Шальто А.А.* Автоматное программирование. 2-е изд. СПб.: Питер, 2011. 176 с.
11. *Энгель М.В., Афонин С.В., Белов В.В.* Методика предварительной оценки точности спутниковых метеоданных при атмосферной коррекции измерений ТЗП из космоса // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 692–694.

M.V. Engel, *S.V. Afonin*. **Software for a computing system for satellite data correction.**

A description is presented of software for a computing system of satellite data correction that provides calculations in automated mode with the use of distributed data. Two types of data: predictive models and satellite measurements are used as input data on the atmospheric state. The method is developed for assessment of the relevance of meteorological satellite data, which allows estimation of the reliability of calculated results. The system provides correction for the distorting effect of the atmosphere for a wide variety of satellite sensors operating under diverse atmospheric meteorological conditions and combination of various distorting factors.