

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПЕРАТИВНОГО РЕГИОНАЛЬНОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ Ч. 1. MODIS*

А. А. ЛАГУТИН, Ю. А. НИКУЛИН, А. П. ЖУКОВ,
Ал. А. ЛАГУТИН, А. Н. РЕЗНИКОВ, В. В. СИНИЦИН, И. А. ШМАКОВ
Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
e-mail: lagutin@theory.asu.ru

This paper summarizes the approaches and codes used at Altai State University to retrieve the atmospheric and land surface parameters from the MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data.

Введение

В XX веке средняя температура воздуха в приземном слое атмосферы Земли увеличилась примерно на 0.6 градуса [1]. Этот, самый быстрый за последнюю тысячу лет, рост температуры воздуха в [2] связывается с изменением примерно на 1 % баланса между поглощением солнечного излучения и тепловым излучением Земли. Возможными причинами изменения баланса считаются парниковые газы (прежде всего CO_2 , CH_4) и аэрозоли [1, 3].

В Сибири климатические изменения происходят быстрее [4–6]. В соответствии с [4], в первые 90 лет XX века температура увеличилась лишь на 0.4 градуса, а в последнее десятилетие — уже примерно на 0.7 градуса. Данные [5] дают детальную картину происходящих изменений температуры на зональном уровне.

Понятно, что уточнение знаний о динамике поведения Земли как системы, вычленение и оценка основных факторов — естественных и антропогенных, определяющих ее современное состояние, а также прогнозирование характеристик системы на различные сроки в различных регионах в настоящее время возможны лишь при использовании результатов моделирования в рамках глобальных и региональных климатических моделей. Однако для старта этих моделей требуются данные по “критическим” параметрам каждой оболочки Земли с необходимым пространственным и временным разрешением. Особую важность

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по образованию и программы “Информационно-телекоммуникационные ресурсы СО РАН”.

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2007.

имеют данные, позволяющие уточнять используемые в моделях параметризации между различными компонентами каждой оболочки Земли при воздействии того или иного антропогенного фактора и связи между различными элементами “системы Земля”.

Научным сообществом в конце 80-х — начале 90-х годов установлено, что основным источником требуемых для моделирования данных должна быть информация приборов, вынесенных на космические платформы (см. обсуждение этой проблемы в [7–11]). Симпозиумы и рабочие совещания экспертов в тот период, на которых анализировались получаемые спутниковые данные, их влияние на качество прогнозов, а также формулировались требования к спутниковым приборам следующего поколения, глобальным климатическим моделям и методам усвоения ими новых данных, стимулировали развитие в 90-е годы как космического приборостроения, так и вычислительных технологий прогнозирования и мониторинга.

Для достижения необходимых частоты обновления данных и их точности потребовалось дальнейшее развитие методов восстановления характеристик атмосферы и подстилающей поверхности (ПП) Земли из космоса. Исследовательские работы в этом направлении в свою очередь повлияли на требования, предъявляемые к спутниковым приборам. Хорошим примером взаимодействия “требуемая точность — метод измерения — параметры радиометра” служит изложенная в [11] история создания гиперспектрометра AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder), которая началась в 1989 году. Сегодня AIRS вместе с СВЧ-радиометром AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) должен обеспечить измерение температуры атмосферы с погрешностью примерно 1 К в километровом слое даже при значительном закрытии поверхности Земли облаками [12].

Первыми итогами почти 15-летней системной работы многочисленных международных научных коллективов при финансовой поддержке исследовательской программы Earth Observing System (EOS)/NASA стали создание новых приборов и алгоритмов, вывод на полярную солнечно-синхронную орбиту 18 декабря 1999 года пилотной платформы Terra. Пять приборов спутника — MODIS, ASTER, MISR, CERES, MOPITT — с февраля 2000 года начали поставлять на операционном уровне данные, необходимые для восстановления ключевых параметров атмосферы и ПП. Представленные в табл. 1 (по данным [13]) объекты и основные измеряемые характеристики оболочки Земли, исследуемые этими приборами, ясно показывают масштаб начатых мониторинговых наблюдений с одной космической платформы.

Сегодня можно утверждать, что поставляемые со спутника Terra данные открыли принципиально новый этап глобальных мониторинговых наблюдений “системы Земля” из космоса. Аэрозольная оптическая толщина атмосферы над сушей, радиационный баланс на нижней границе атмосферы, микрофизические параметры облаков, альbedo подстилающей поверхности и ряд других характеристик впервые стали измеряться в глобальном масштабе на регулярной основе. В работе [14], например, отмечается, что только по данным MODIS восстанавливаются 107 параметров океана.

Представленная исследователям в различных частях мира возможность принимать в режиме реального времени данные центрального прибора этого спутника — 36-канального спектрометрического прибора MODIS [15] — позволила начать также региональный мониторинг атмосферы и ПП (АПП) на новом количественном уровне.

Уникальные пространственные и радиометрические характеристики MODIS стимулировали разработку Алтайским госуниверситетом и Главным управлением МЧС по Алтайскому краю совместного проекта космического мониторинга Алтая и соседних территорий в интересах образования, науки, мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций

Таблица 1. Назначение радиометров спутника Terra (по данным [13])

Оболочки Земли	Исследуемые объекты, измеряемые характеристики	Приборы
Атмосфера	Облака	MODIS, MISR, ASTER
	Радиационный баланс	CERES, MODIS, MISR
	Химия тропосферы	MOPITT
	Аэрозоль	MODIS, MISR
	Профиль температуры	MODIS
	Профиль влажности	MODIS, MISR, ASTER
Подстилающая поверхность	Альbedo ПП	MODIS, MISR, ASTER
	Характеристики растительного покрова ПП	MODIS, MISR, ASTER
	Температура ПП	MODIS, ASTER
	Пожары	MODIS, ASTER
	Вулканы	MODIS, MISR, ASTER
Океан	Температура поверхности	MODIS
	Фитопланктон и растворенное органическое вещество	MODIS, MISR
Криосфера	Снежный покров	MODIS, ASTER
	Ледовый покров	MODIS, ASTER
	Измерение ледового покрова	ASTER

Примечание: MODIS — MODerate resolution Imaging Spectroradiometer, MISR — Multi-angle Imaging SpectroRadiometer, ASTER — Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, CERES — Cloud and the Earth's Radiant Energy System, MOPITT — Measurements Of Pollution In The Troposphere

природного характера.

Работа по созданию центра космического мониторинга в Барнауле ($53^{\circ} 21'$ с.ш., $83^{\circ} 47'$ в.д.) на базе MODIS начата в марте 2001 года. С января 2002 года станция приема космической информации ЕОСкан, созданная в ИТЦ “СканЭкс” [16], обеспечивает прием данных этого радиометра. На первом этапе усилия участников проекта были направлены на развитие вычислительных технологий космического мониторинга, проведение тестовых измерений характеристик АПП с целью изучения реальных возможностей спектрорадиометра MODIS при решении региональных задач. Эти работы вызваны прежде всего отсутствием в математическом обеспечении станции ЕОСкан необходимого набора пакетов обработки данных MODIS на принятом в 2001 году уровне, что не позволяло авторам внедрять современные вычислительные технологии измерения параметров системы АПП из космоса.

После вывода на орбиту второго спутника Aqua/EOS-NASA [17] в мае 2002 года был открыт доступ к данным не только второго спектрорадиометра MODIS, но и уникального 2378-канального инфракрасного зондировщика AIRS [11], СВЧ-радиометра AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth observing system) [18]. С января 2005 года, после модернизации станции ЕОСкан и внедрения созданных авторами пакетов выделения данных каждого прибора из потока Aqua, показания этих приборов были включены в мониторинговые работы.

Эта и следующая работы посвящены обсуждению математических моделей, алгоритмов и вычислительных программ — математических технологий [19], используемых в центре космического мониторинга Алтайского госуниверситета и Главном управлении МЧС

по Алтайскому краю при проведении оперативного спутникового мониторинга. Хотя сегодня две станции центра (ЕОСкан и АЛИСА) обеспечивают прием данных семи радиометров с нескольких спутниковых платформ, в этих работах рассматриваются лишь три исследовательских прибора EOS/NASA — MODIS, AIRS, AMSR-E, регистрирующих излучение системы атмосфера — подстилающая поверхность Земли в оптическом, ИК- и СВЧ-диапазонах. Выбор этих приборов обусловлен не только имеющейся в центре возможностью принимать данные этих радиометров в режиме реального времени и осуществлять полный цикл обработки, включая восстановление принципиальных для региона параметров, но и тем фактом, что они являются базой новой группы приборов, предназначенных для работы уже на операционном уровне в рамках многолетней Национальной программы США глобального космического мониторинга NPOESS (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) и NPP (NPOESS Preparatory Project). Создаваемые операционные версии этих приборов — VIIRS (Visible Infrared Imager/Radiometer Suite), CrIS (Cross-track Infrared Sounder), ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) — должны заменить в начале следующего десятилетия инструменты, действующие на спутниках серии NOAA [20–22].

Данная работа посвящена обсуждению технологий, используемых авторами при обработке данных MODIS. Описываются все этапы мониторинга — от момента приема “сырого” потока данных прибора в центре до создания продуктов. Дается информация о вычислительных пакетах, позволяющих восстанавливать геофизические параметры системы, о формате представления результатов обработки, о некоторых алгоритмах и создаваемых продуктах.

1. Техническая и информационная база мониторинга

Передачу данных установленного на спутниковой платформе прибора в режиме реального времени принято в литературе называть режимом Direct Broadcast (DB) [22]. Передаваемый при таком режиме поток данных включает скорости счета в каналах прибора, а также дополнительную информацию, которая позволяет конвертировать скорость счета для наблюдаемого участка Земли (пикселя) в интенсивность и осуществлять привязку каждого пикселя к местности. При наличии наземной станции приема эту информацию можно получать в течение всего периода, когда спутник находится в зоне видимости станции.

Программой EOS/NASA предусмотрен сброс на частоте примерно 8.1 ГГц данных MODIS/Terra и данных всех приборов с платформы Aqua. Понятно, что принимаемая информация может быть использована в региональном центре для мониторинга при наличии вычислительных пакетов, позволяющих проводить декодирование, геопривязку и калибровку, а также восстановление геофизических параметров системы.

В настоящее время информационной основой проводимых в центре мониторинговых наблюдений служат данные, получаемые после предварительной обработки (распаковки) принимаемых станцией ЕОСкан в режиме DB информации MODIS/Terra и всего потока с платформы Aqua. Характеристики спутников Terra, Aqua и спектрорадиометра MODIS приведены в табл. 2 и 3.

Расписание сеансов связи со спутниками определяется по их орбитальным элементам, выставляемым на сайте [24]. Параметры траектории спутника рассчитываются для каждого витка. В табл. 4 приведено расписание сеансов связи со спутниками 17 октября 2006 года. В течение 16 сеансов связи со спутниками Terra и Aqua в день станция позволяет по-

Таблица 2. Характеристика спектральных каналов MODIS [23]

№ канала	Длина волны, нм	Разрешение в надире, м	№ канала	Длина волны, нм	Разрешение в надире, м
1	620...670	250	20	3660...3840	1000
2	841...876	250	21	3929...3989	1000
3	459...479	500	22	3929...3989	1000
4	545...565	500	23	4020...4080	1000
5	1230...1250	500	24	4433...4498	1000
6	1628...1652	500	25	4482...4549	1000
7	2105...2155	500	27	6535...6895	1000
8	405...420	1000	28	7175...7475	1000
9	438...448	1000	29	8400...8700	1000
10	483...493	1000	30	9580...9880	1000
11	526...536	1000	31	10780...11280	1000
12	546...556	1000	32	11770...12270	1000
13	662...672	1000	33	13185...13485	1000
14	673...683	1000	34	13485...13785	1000
15	743...753	1000	35	13785...14085	1000
16	862...877	1000	36	14085...14385	1000
17	890...920	1000			
18	931...941	1000			
19	915...965	1000			
26	1360...1390	1000			

Таблица 3. Характеристики спутников Тегга, Aqua и спектрорадиометра MODIS [23]

№ п/п	Параметр	Значение
1	Высота орбиты	705 км
2	Наклонение орбиты	98.2°
3	Длительность одного витка	98.9 мин
4	Время прохождения экватора: Тегга (нисходящий узел) Аqua (восходящий узел)	10 ч 30 мин 13 ч 30 мин
5	Период повторения орбит	16 дней
6	Полоса сканирования на экваторе	2330 (±55°) × 10 км (в надире)
7	Время сканирования	1.47 с
8	Число пикселей с разрешением 1 км (в надире) в строке	1354
9	Количество каналов MODIS	36
10	Диапазон длин волн	0.405...14.385 мкм
11	Число ИК-каналов	16
12	Разрешение (в надире): каналы 1 и 2 каналы 3–7 каналы 8–36	250 м 500 м 1000 м

Таблица 4. Расписание сеансов связи со спутниками Terra и Aqua 17 октября 2006 г.

Спутник	Время сеанса	α^a	Азимут ^b	Asc/Des ^c
TERRA	00:21:13–00:30:35	6	281	Asc
AQUA	01:08:46–01:21:13	17	87	Des
AQUA	02:46:16–03:00:24	77	286	Des
AQUA	04:24:28–04:36:16	15	307	Des
AQUA	06:03:22–06:09:00	2	330	Des
TERRA	08:57:00–09:03:28	2	73	Des
TERRA	10:32:48–10:46:18	30	94	Des
AQUA	10:46:16–10:56:09	8	43	Asc
TERRA	12:10:35–12:24:22	45	293	Des
AQUA	12:20:56–12:34:33	38	64	Asc
TERRA	13:48:56–13:59:20	10	314	Des
AQUA	13:58:41–14:12:24	35	263	Asc
AQUA	15:40:46–15:48:39	4	284	Asc
TERRA	18:36:52–18:41:33	1	27	Asc
TERRA	20:09:13–20:20:37	13	50	Asc
TERRA	21:44:48–21:58:52	65	70	Asc
TERRA	23:23:37–23:36:28	21	269	Asc

^aУгол места в точке кульминации.

^bАзимут спутника при входе в зону наблюдения станции в Барнауле.

^cТип траектории: нисходящий узел — Asc, восходящий узел — Des.

лучать информацию, отражающую состояние атмосферы и ПП в зоне примерно $30^\circ \dots 80^\circ$ с.ш., $30^\circ \dots 130^\circ$ в.д. Пример зон покрытия MODIS для четырех дневных проходов Terra и Aqua приведен на рис. 1.

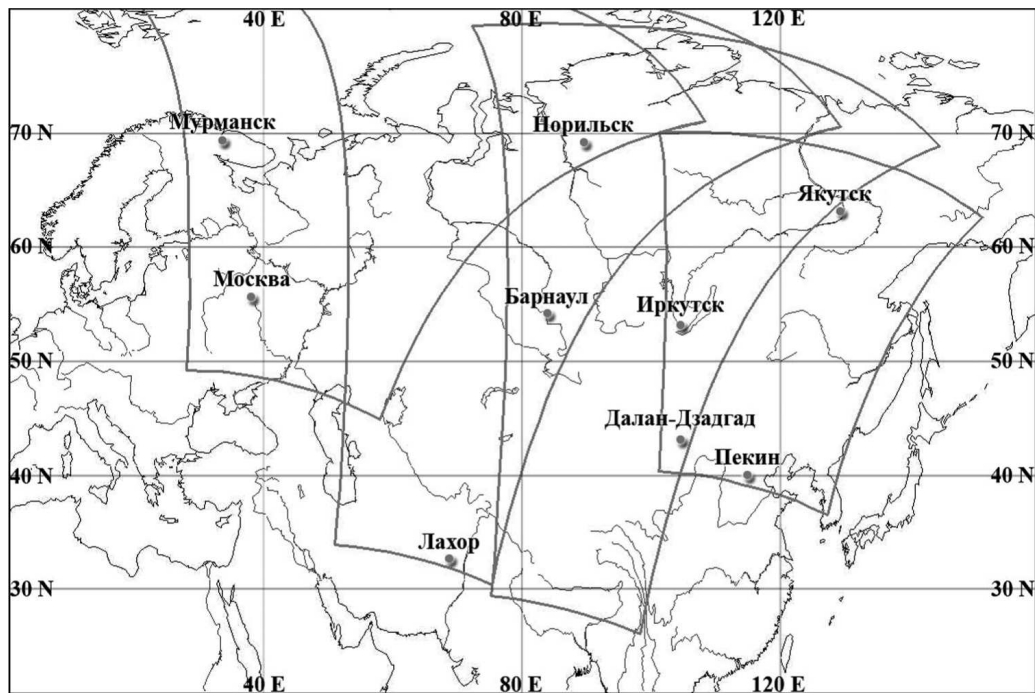
Схема космического мониторинга с использованием данных MODIS, реализованная в центре, состоит из таких основных этапов, как:

- первичная обработка данных, включающая геопривязку и калибровку;
- построение маски облачности;
- определение измеряемых величин по реализованным в центре алгоритмам, интеграция данных космического мониторинга в HDF-формате с ГИС;
- создание файлов (в текстовом и графическом форматах) с результатами измерений, передача оперативной информации пользователям.

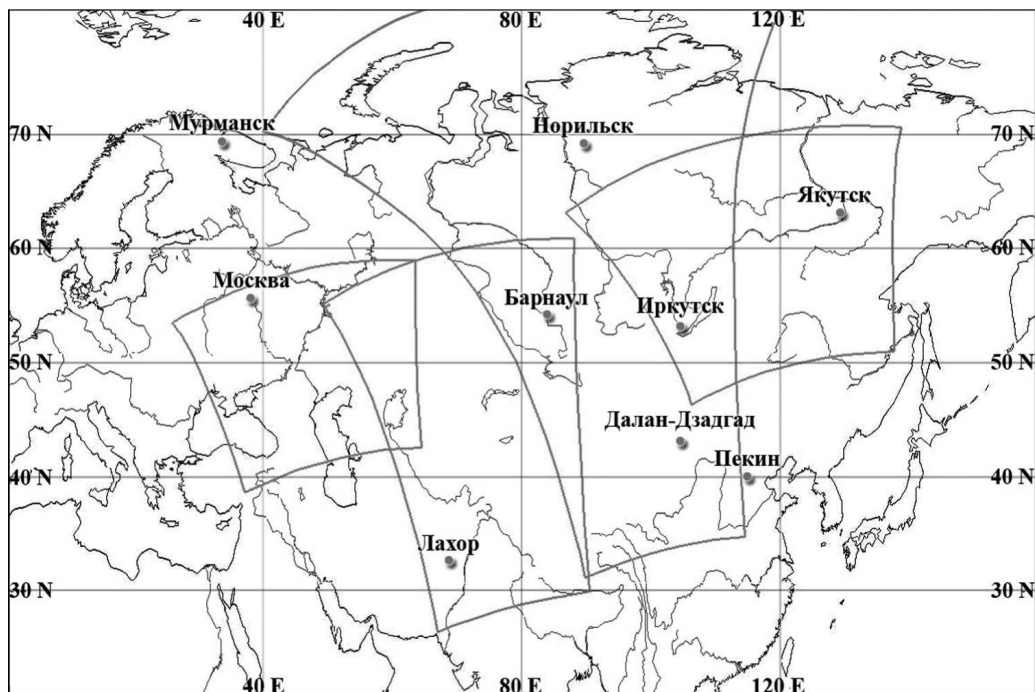
Распаковка, географическая привязка и калибровка потока цифровой информации MODIS, полученной станцией в режиме DB, осуществляются с помощью пакета IMAPP (International MODIS/AIRS Processing Package), созданного в Инженерно-космическом центре Висконсинского университета (Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison, Madison WI) [25].

Итогом процедуры геопривязки являются продукты (MOD03/Terra, MYD03/Aqua), которые дают географические координаты для каждого пикселя с километровым разрешением, высоту над уровнем моря, зенитные углы освещения, визирования, а также азимутальный угол спутника относительно Солнца.

Проверка точности абсолютных значений географических координат, выдаваемых программой геопривязки пакета IMAPP, проведена по спутниковым снимкам Томской области, на которых постоянно присутствует точка термальных аномалий (горящий факел на газовом месторождении Лугинецкое ($58^\circ 17'$ с.ш., $78^\circ 88'$ в.д.)). Установлено, что абсолют-



a



б

Рис. 1. Зоны покрытия территории России и соседних государств спектрометриком MODIS для четырех дневных проходов спутника Terra (*a*) и Aqua (*б*) 25 ноября 2006 г. при приеме данных станцией, расположенной в Барнауле ($53^{\circ}21'$ с.ш., $83^{\circ}47'$ в.д.)

ная погрешность привязки изображения MODIS/Terra к местности не превышает 150 м. Более точный анализ погрешности геопривязки, выполненный NASA, показал [26], что в направлении движения спутника средняя погрешность привязки составляет 18 м (при среднеквадратичном отклонении $\sigma = 38$ м), а в направлении скана — 4 м (при $\sigma = 40$ м).

Авторы не имели и не имеют сейчас технических средств для проверки точности калибровки данных MODIS. Предполагалось, что калибровка осуществляется на заявленном уровне [27, 28]. Исследования [29] с использованием валидированных данных AIRS/Aqua в основном подтвердили это предположение для большинства проверяемых ИК-каналов MODIS на платформе Aqua. Вместе с тем исследования показали, что для ряда каналов требуются корректировка функции чувствительности и введение поправочных коэффициентов.

Информационной базой проводимых в центре исследований являлись геокоординированные и калиброванные данные 27 каналов MODIS (каналы 1–7, 17–19, 20–36).

2. Пакеты обработки данных MODIS

Основой программных комплексов, использованных в настоящей работе при восстановлении характеристик атмосферы и ПП по данным MODIS, являются базовые алгоритмы [30]. Они получены в центре космического мониторинга Алтайского госуниверситета из лаборатории DRL (Direct Readout Lab, GSFC/NASA) под лицензией, допускающей их изучение, использование, изменение, а также передачу измененных программ другим пользователям. Базовые алгоритмы сгруппированы в PGE (Product Generation Executive), каждый из которых содержит исходные тексты программ, справочные таблицы (Look-Up Tables, LUTs), обзор кода, описание требуемых входных и получаемых выходных файлов, а также краткое руководство по сборке и запуску. PGE, являющиеся копиями операционных комплексов для MODIS, предназначены для работы в составе обрабатывающего “дерева”, вследствие чего запуск последующих PGE возможен лишь при наличии результатов работы предыдущих. Сборка и установка PGE на конкретной платформе, комплектование их входными и вспомогательными файлами, установка параметров обработки входят в обязанности пользователя.

Предоставляемые PGE комплектуются системой сборки на основе программы Make. Однако из-за наличия у Make недостатков для некоторых из используемых базовых алгоритмов разработана новая система сборки на основе GNU Autotools. В настоящее время используются PGE как собранные штатной системой сборки, так и с использованием новой системы.

Данные, получаемые в результате работы PGE, сохраняются, как правило, в файлах формата HDF (Hierarchical Data Format) [31]. Формат HDF, разрабатываемый в настоящее время Группой HDF (the HDF Group), позволяет хранить в одном файле массивы научных данных (Scientific Data Sets, SDS), растровые изображения (в том числе сжатые), атрибуты (поименованные текстовые строки, либо ассоциированные с некоторым набором данных, либо глобальные для всего файла), а также группировать данные для получения структурных элементов более высокого уровня. В 1993 году формат HDF был избран NASA в качестве основного формата для хранения данных EOS [32]. Для учета специфических требований, возникающих при работе со спутниковыми данными, NASA в сотрудничестве с NCSA (National Center for Supercomputer Applications), являвшимся разработчиком HDF в то время, разработан формат HDF-EOS. На рис. 2


```

netcdf MOD04_L2.A20030821053320 {
dimensions:
Cell_Along_Swath_mod04 = 203 ;
Cell_Across_Swath_mod04 = 135 ;
Solution_3_Land_mod04 = 3 ;
Solution_1_Land_mod04 = 2 ;
Solution_2_Land_mod04 = 3 ;
MODIS_Band_Land_mod04 = 5 ;
QA_Byte_Land_mod04 = 5 ;
Solution_Ocean_mod04 = 2 ;
MODIS_Band_Ocean_mod04 = 7 ;
Solution_Index_mod04 = 9 ;
QA_Byte_Ocean_mod04 = 5 ;

variables:
float Longitude(Cell_Along_Swath_mod04, Cell_Across_Swath_mod04) ;
Longitude:long_name = "Geodetic Longitude" ;
Longitude:units = "Degrees_east" ;
Longitude:scale_factor = 1. ;
Longitude:add_offset = 0. ;
Longitude:Parameter_Type = "MODIS Input" ;
Longitude:Cell_Across_Swath_Sampling = 5, 1345, 10 ;
Longitude:Cell_Along_Swath_Sampling = 5, 2025, 10 ;
Longitude:Geolocation_Pointer = "Geolocation data not applicable" ;
Longitude:FillValue = -999.f ;
Longitude:valid_range = -180.f, 180.f ;
float Latitude(Cell_Along_Swath_mod04, Cell_Across_Swath_mod04) ;
Latitude:long_name = "Geodetic Latitude" ;
Latitude:units = "Degrees_north" ;
Latitude:scale_factor = 1. ;
Latitude:add_offset = 0. ;
Latitude:Parameter_Type = "MODIS Input" ;
Latitude:Cell_Across_Swath_Sampling = 5, 1345, 10 ;
Latitude:Cell_Along_Swath_Sampling = 5, 2025, 10 ;
Latitude:Geolocation_Pointer = "Geolocation data not applicable" ;
Latitude:FillValue = -999.f ;
Latitude:valid_range = -90.f, 90.f ;
double Scan_Start_Time(Cell_Along_Swath_mod04, Cell_Across_Swath_mod04) ;
Scan_Start_Time:long_name = "TAI Time at Start of Scan replicated across the swath" ;
Scan_Start_Time:units = "Seconds since 1993-1-1 00:00:00.0 0" ;
Scan_Start_Time:scale_factor = 1. ;
Scan_Start_Time:add_offset = 0. ;
Scan_Start_Time:Parameter_Type = "MODIS Input" ;
Scan_Start_Time:Cell_Across_Swath_Sampling = 5, 1345, 10 ;
Scan_Start_Time:Cell_Along_Swath_Sampling = 5, 2025, 10 ;
Scan_Start_Time:Geolocation_Pointer = "Internal geolocation arrays" ;
Scan_Start_Time:FillValue = -999. ;
Scan_Start_Time:valid_range = 0., 3155800064. ;
short Solar_Zenith(Cell_Along_Swath_mod04, Cell_Across_Swath_mod04) ;
Solar_Zenith:long_name = "Solar Zenith Angle, Cell to Sun" ;
Solar_Zenith:units = "Degrees" ;
Solar_Zenith:scale_factor = 0.00999999776482582 ;
Solar_Zenith:add_offset = 0. ;
Solar_Zenith:Parameter_Type = "MODIS Input" ;
Solar_Zenith:Cell_Across_Swath_Sampling = 5, 1345, 10 ;
Solar_Zenith:Cell_Along_Swath_Sampling = 5, 2025, 10 ;
Solar_Zenith:Geolocation_Pointer = "Internal geolocation arrays" ;
Solar_Zenith:FillValue = -9999s ;
Solar_Zenith:valid_range = 0s, 18000s ;
...
byte Cloud_Mask_QA(Cell_Along_Swath_mod04, Cell_Across_Swath_mod04) ;
Cloud_Mask_QA:long_name = "Cloud Mask info on 10x10 km resolution" ;
Cloud_Mask_QA:units = "None" ;
Cloud_Mask_QA:scale_factor = 1. ;
Cloud_Mask_QA:add_offset = 0. ;

```

Размеры

Локальные атрибуты

Переменная

Глобальные атрибуты

```

Cloud_Mask_QA:Parameter_Type = "MODIS Input" ;
Cloud_Mask_QA:Cell_Across_Swath_Sampling = 5, 1345, 10 ;
Cloud_Mask_QA:Cell_Along_Swath_Sampling = 5, 2025, 10 ;
Cloud_Mask_QA:description = "\n",
"\n",
"Cloud_mask_QA flags:
"
"
"QA Flag Name      Number of      Bit Value      Description
"                Bits
"-----
"Cloud Mask        1              0              Undetermined
"                1              1              Determined
"
"Cloud Mask        2              0              0-25% Cloudy pixels
"Quality Flag      1              1              25-50% cloudy pixels
"                2              2              50-75% cloudy pixels
"                3              3              75-100%cloudy pixels
"
"Day/Night         1              0              Night
"flag              1              1              Day
"
"Sun glint         1              0              Yes
"flag              1              1              No
"
"Snow/Ice flag     1              0              Yes
"                1              1              No
"
"Land/Water        2              0              Water (ocean)
"flag              1              1              Coastal
"                2              2              Desert
"                3              3              Land
"----- 1 byte total -----
" ;
Cloud_Mask_QA:Geolocation_Pointer = "Internal geolocation arrays" ;
Cloud_Mask_QA:FillValue = '\0' ;
Cloud_Mask_QA:valid_range = '\0', '\377' ;
...

// global attributes:
:HDFEOSVersion = "HDFEOS_V2.8" ;
:StructMetadata_0 = "GROUP=SwathStructure\n",
"\tGROUP=SWATH_1\n",
"\t\tSwathName=\\"mod04\\"\n",
"\t\tGROUP=Dimension\n",
"\t\t\tOBJECT=Dimension_1\n",
"\t\t\t\tDimensionName=\\"Cell_Along_Swath\\"\n",
"\t\t\t\t\tSize=203\n",
...

:Number_of_Instrument_Scans = 203 ;
:Maximum_Number_of_1km_Frames = 1354 ;
:title = "\n",
"MODIS HDF File Specification MOD04_L2: MODIS Level 2 Aerosol over Land and \n",
"Ocean Product \n",
" ;
:Slope_and_Offset_Usage = "\n",
"The local SDS scale_factor and add_offset attributes are used for the \n",
"conversion of stored integer data to geophysical floating point numbers. \n",
"The implementation follows conventional HDF usage (See HDF Users Guide): \n",
" \n",
"float value = scale_factor*(stored integer - add_offset) \n",
" \n",
"The unit of the derived floating point value is indicated in the \'units\' \n",
"local attribute which is also provided. \n",
" ;

```

Рис. 2. Пример HDF-файла.

в качестве примера приведена структура HDF-файла MOD04_L2, генерируемого PGE04. Показаны размеры массивов, используемых для представления научных данных, переменные, содержащие эти данные, и атрибуты, имеющиеся у переменных. В конце расположены глобальные атрибуты, в том числе метаданные.

Базовым инструментом для работы с данными в формате HDF является пакет HDF4, разрабатываемый The HDF Group. В состав пакета входит набор утилит для работы с

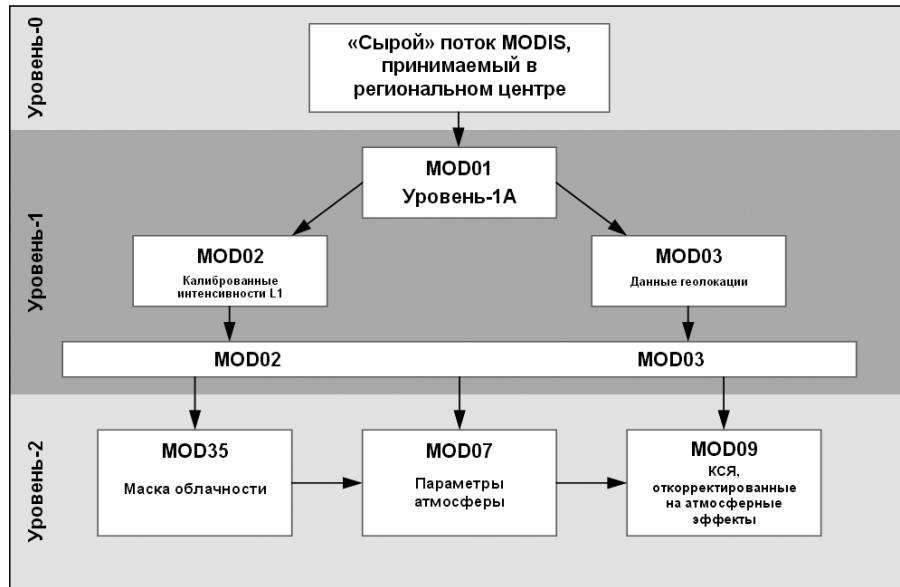


Рис. 3. Последовательность обработки данных MODIS при восстановлении характеристик атмосферы и проведении атмосферной коррекции.

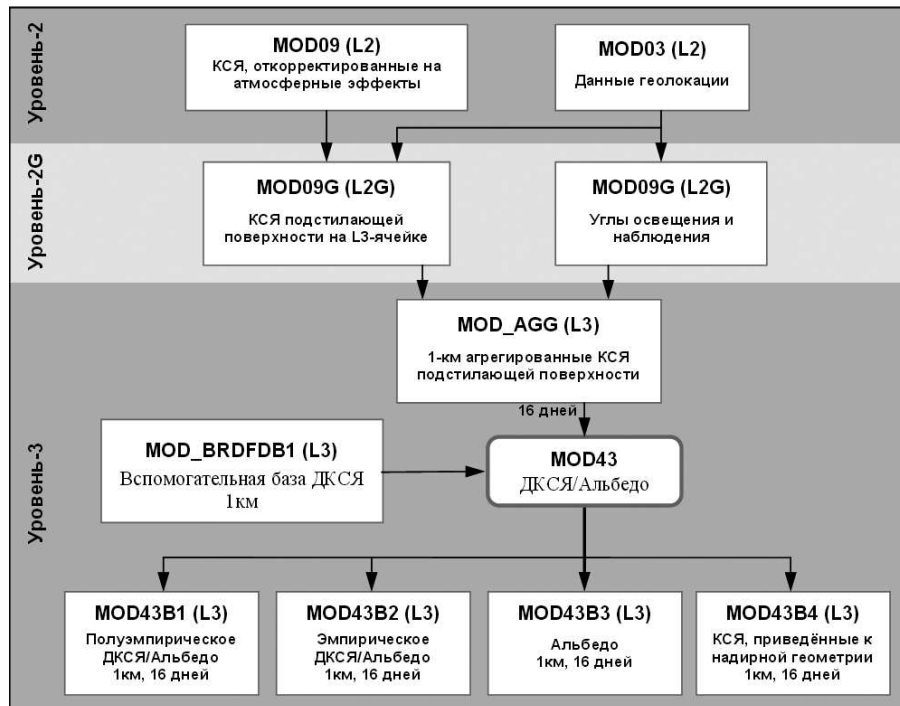


Рис. 4. Последовательность обработки откорректированных на атмосферные эффекты данных MODIS при восстановлении ДКСЯ и альbedo.

файлами указанного формата (HDFDUMP, hdiff, hdp и др.), а также библиотеки, реализующие набор основных функций для доступа к данным внутри HDF-файла. В библиотеках реализованы интерфейсы, позволяющие вызывать функции пакета из программ на языках C и FORTRAN. Кроме того, существует возможность работы с данными HDF-файлов данного формата из программ, написанных на языках Tcl (при расширении Tcl-NAP) [33] и IDL [34].

Иногда удобнее работать с данными в более традиционном “двоичном” (или, если объем данных невелик, в текстовом) формате. Для получения данных из HDF в этих форматах различными разработчиками были созданы такие программы, как упомянутая выше hdp, HDFDUMP [35], hdfsos2bin.pro [36] и др. Для доступа к данным в этом случае зачастую достаточно стандартных средств языков программирования.

На рис. 3 и 4 в качестве примера представлена последовательность обработки данных MODIS при проведении атмосферной коррекции, восстановлении двунаправленных коэффициентов спектральной яркости (ДКСЯ) и альбедо. Указанные на этих рисунках продукты вычислялись последовательно с использованием семи вычислительных комплексов: IMAPP [25] и PGE 03, 11–13, 22, 23 четвертой версии [30].

3. Алгоритмы восстановления характеристик атмосферы и подстилающей поверхности

3.1. Восстановление температуры подстилающей поверхности, профилей температуры, влажности и концентрации озона в атмосфере

Регрессионный алгоритм [37] принят в качестве операционного в программе EOS/NASA при восстановлении характеристик атмосферы и температуры подстилающей поверхности по данным MODIS с разрешением 5×5 км (в надире). Этот эффективный с вычислительной точки зрения подход использует предварительно установленные соотношения атмосферных параметров, измеренных радиозондами и наземными приборами, и расчетных интенсивностей в ИК-каналах MODIS для каждого профиля из обучающей базы.

Входными параметрами (предикторами) алгоритма являются радиационные температуры 12 каналов MODIS $(BT_k)_{\text{изм}}$, $k = 24, 25, 27 \dots 36$, вычисленные по измеренным радиометром интенсивностям. Температура, влажность, концентрация озона на j -м уровне атмосферы с давлением P_j ($j = 1 \dots 101$) и температура подстилающей поверхности находятся с использованием уравнений вида

$$[T, W, Qz](P_j) = t_{1j}(BT_{25} - BT_{24}) + \sum_{k=27}^{36} t_{2jk}BT_k + t_{3j}(BT_{25} - BT_{24})^2 + \\ + \sum_{k=27}^{36} t_{4jk}BT_k^2/250 + t_{5j}P_{\text{пов}} + t_{6j}f_{\text{land}} + t_{7j}L + t_{8j}M + t_{0j}.$$

Здесь $BT_k = (BT_k)_{\text{изм}} - (BT_k)_{\text{кор}}$ — смещенные радиационные температуры k -го канала MODIS, коррекция обусловлена отличием расчетных интенсивностей от измеренных MODIS; $\{t_{ijk}(\theta, (BT_{31})_{\text{изм}})\}$ — регрессионные коэффициенты для зенитного угла спутника

θ при отклике 31-го канала $(BT_{31})_{\text{изм}}$; $P_{\text{пов}}$ — атмосферное давление в области восстановления; f_{land} — доля пикселей ($0 \dots 1$), определенных в области наблюдения 5×5 км как суша; L — широта зоны наблюдения; M — месяц наблюдения ($1 \dots 12$).

Регрессионные коэффициенты, представленные в справочных таблицах (LUTs) пакета PGE03 четвертой версии [37, 30], построены для 680 интервалов зенитного угла спутника и семи диапазонов температур 31-го канала $(BT_{31})_{\text{изм}}$.

3.2. Тропосферный аэрозоль

Аэрозоль — важный компонент системы АПП, влияющий на климат посредством многих механизмов (см. обзоры [38–42] и приведенную в них библиографию). Значимым результатом современного этапа исследований воздействия аэрозолей на климат стал вывод о необходимости непрерывных и глобальных измерений характеристик аэрозоля с использованием спутниковых систем при их интеграции с наземными и самолетными подспутниковыми данными [38–42]. Именно в таком направлении развивались в последние десятилетия отечественные исследования [38, 43], этот подход используется атмосферной группой программы EOS/NASA при разработке алгоритма восстановления аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы над поверхностью суши [44, 45] и его уточнении (см., например, [45, 46]).

Предложенный в [44] алгоритм восстановления АОТ тропосферного аэрозоля основан на установленной в теории переноса связи между интенсивностью солнечного излучения $L(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)$ [Вт/(м² · ср · мкм)], регистрируемой спектро радиометром спутника на верхней границе атмосферы в случае ламбертовой подстилающей поверхности, и характеристиками атмосферы и ПП (см., например, уравнения (3.46), (3.48) в [47]). Применительно к задачам дистанционного зондирования это равенство принято записывать в следующем виде [44, 48]:

$$L(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi) = L_0(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi) + \frac{T^\downarrow(\mu_s, \lambda)T^\uparrow(\mu_v, \lambda)F_0(\lambda)\mu_s\rho_s(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)}{\pi [1 - \rho_s(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)s(\lambda)]}. \quad (1)$$

Здесь $L_0(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)$ есть вклад в показание спектро радиометра, обусловленный отражением солнечного излучения от полубесконечной атмосферы: $T^\downarrow(\mu_s, \lambda)$, $T^\uparrow(\mu_v, \lambda)$ — функции пропускания атмосферы излучения с длиной волны λ на участках Солнце — поверхность Земли и поверхность Земли — спектро радиометр соответственно; $F_0(\lambda)\mu_s/\pi$ — интенсивность солнечного излучения, падающая на верхнюю границу атмосферы; $\rho_s(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)$ — коэффициент спектральной яркости (КСЯ) подстилающей поверхности, когда атмосфера над поверхностью отсутствует; $s(\lambda)$ — сферическое альbedo атмосферы в случае, когда изотропное излучение входит в атмосферу через ее нижнюю границу. В записанных выше функциях θ есть зенитный угол Солнца ($\mu_s = \cos \theta$), ϑ — зенитный угол спутника ($\mu_v = \cos \vartheta$), φ — азимутальный угол спутника относительно Солнца. Поскольку MODIS измеряет интенсивность солнечного излучения, падающего на верхнюю границу атмосферы, то в (1) удобно перейти к безразмерным величинам:

$$\rho(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi) = \frac{L(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)}{F_0\mu_s/\pi}, \quad \rho_0(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi) = \frac{L_0(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)}{F_0\mu_s/\pi}. \quad (2)$$

С учетом (2), для КСЯ системы атмосфера — подстилающая поверхность Земли ρ

получаем следующее уравнение:

$$\rho(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi) = \rho_0(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi) + \frac{T^\downarrow(\mu_s, \lambda)T^\uparrow(\mu_v, \lambda)\rho_s(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)}{1 - \rho_s(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)s(\lambda)}. \quad (3)$$

В приближении однократного рассеяния из (3) можно получить, что для подстилающей поверхности с малыми значениями КСЯ (темные поверхности) и АОТ ($\tau_a < 1$) “аэрозольный сигнал” ($\rho_a = \rho - \rho_{\text{мол}} - \rho_s$) определяется альбедо однократного рассеяния аэрозоля ω_0 , индикатрисой рассеяния $P_a(\Theta)$ и τ_a :

$$\rho_a \approx \omega_a \tau_a P(\Theta) / (4\mu_s \mu_v). \quad (4)$$

Другими словами, после исключения из сигнала вкладов молекулярного рассеяния и ПП, восстановление АОТ атмосферы возможно при некоторых предположениях об оптических свойствах (ω_0, P) регистрируемого аэрозоля.

Применение результата (4) в спутниковых технологиях мониторинга АОТ сдерживалось сложностью оценки коэффициента интенсивности яркости подстилающей поверхности ρ_s . Только после установления в [49] связи между КСЯ подстилающей поверхности в оптическом диапазоне и показанием прибора на верхней границе атмосферы в ближнем ИК-диапазоне ($\rho_s(0.66) = \rho(2.13)/2$, $\rho_s(0.47) = \rho(2.13)/4$) была открыта возможность мониторинга АОТ над поверхностью суши.

Реализуемый в пакете PGE04 алгоритм определения АОТ для участка поверхности суши 10×10 км в надире [44] включает четыре этапа.

На первом этапе осуществляется поиск темных пикселей $0.01 \leq \rho(2.15) \leq 0.25$ в анализируемой области изображения поверхности суши (исключая водные и покрытые снегом/льдом) и определяется яркость подстилающей поверхности $\rho_s(0.66)$ (канал 1) и $\rho_s(0.47)$ (канал 3) в оптическом диапазоне по данным $\rho(2.13)$ с использованием установленных в [49] эмпирических соотношений $\rho_s(0.66) = \rho(2.13)/2$, $\rho_s(0.47) = \rho(2.13)/4$.

На втором этапе проводится предварительная оценка АОТ с использованием справочных таблиц для континентальной модели аэрозоля.

На третьем этапе определяется аэрозольная модель (пылевая, городская или дымовая) с использованием отношения $\Phi = [\omega_0^k \tau_a^k P_a^k](\lambda = 0.66) / [\omega_0^k \tau_a^k P_a^k](\lambda = 0.47)$ коэффициентов отражения атмосферы в каналах 0.66 и 0.47 мкм в приближении однократного рассеяния для континентальной модели аэрозоля.

На четвертом этапе восстанавливается АОТ для определенной на третьем этапе аэрозольной модели. В городской и дымовой моделях учитывается зависимость индикатрисы рассеяния от АОТ в рамках динамической модели [44, 50, 46]. Микрофизические и оптические параметры базовых моделей аэрозоля, используемые при построении справочных таблиц кода PGE 04 [30], приведены в [46].

С целью валидации данного подхода проведены сопоставления полученных нами данных за период май 2002 — октябрь 2003 года с результатами трех станций сети AERONET [51, 52] (Москва, Томск, Красноярск), находящихся в зоне наблюдений центра космического мониторинга в Барнауле. При этом использовались, в отличие от [53], данные AERONET Level 2 (оценки АОТ с учетом всех поправок). Данные для 0.47 мкм и 0.66 мкм получены путем интерполяции результатов [52] для 0.44, 0.50 и 0.67 мкм. Совмещение “точечных” измерений AERONET каждые 15 мин с почти “мгновенными площадными” (10×10 км в надире) данными MODIS проводилось в рамках подхода [53]. Осредненные за период

± 30 мин (по отношению ко времени прохождения спутника Тегга через зону станции) данные AERONET (максимально пять значений) сопоставлялись со средними АОТ/MODIS в зоне 50×50 км с центром в районе расположения станции (максимально 25 значений АОТ). За исследуемый период получено 90 значений, удовлетворяющих указанному выше условию. Как видно из рис. 5, различия находятся в основном в пределах теоретической оценки погрешности измерения АОТ с использованием MODIS: $\Delta(\text{АОТ}) = \pm 0.05 \pm 0.2\text{АОТ}$ [44].

Авторами была проверена справедливость эмпирических соотношений $\rho_s(0.66) = \rho(2.13)/2$, $\rho_s(0.47) = \rho(2.13)/4$, используемых при определении яркости подстилающей поверхности в оптическом диапазоне (каналы 1 и 3) по данным канала 7 из среднего ИК-диапазона. В анализе использовались данные MODIS/Terra, прошедшие процедуру атмосферной кор-

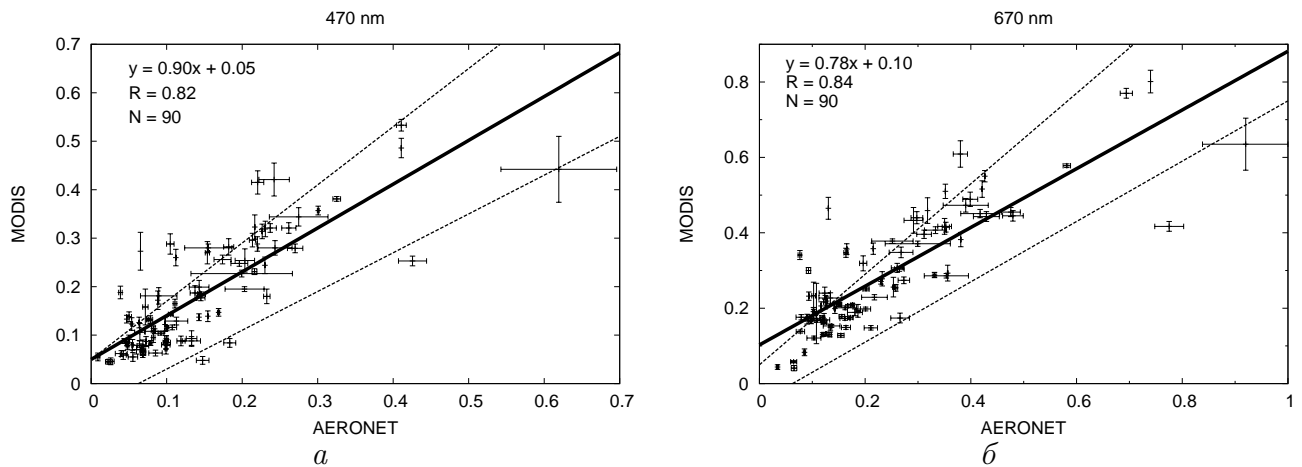


Рис. 5. Сопоставление значений аэрозольной оптической толщины, полученных с использованием MODIS в данной работе, с результатами станций сети AERONET в Москве, Томске, Красноярске: АОТ на длинах волн 0.47 мкм (а) и 0.66 мкм (б).

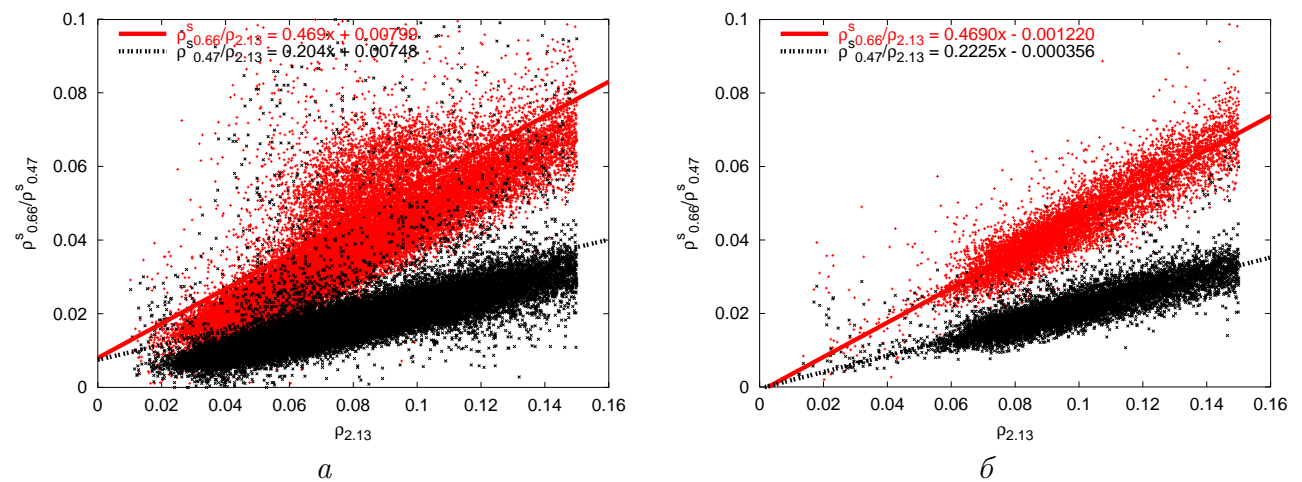


Рис. 6. Зависимость нормированных яркостей в оптических каналах 1 и 3 от яркости в канале 7 из среднего ИК-диапазона $\rho_s(0.66) = \rho(2.13)/2$, $\rho_s(0.47) = \rho(2.13)/4$: а — для всех пикселей изображения; б — для пикселей, в которых $\rho(1.24)/\rho(0.87) > 1.35$.

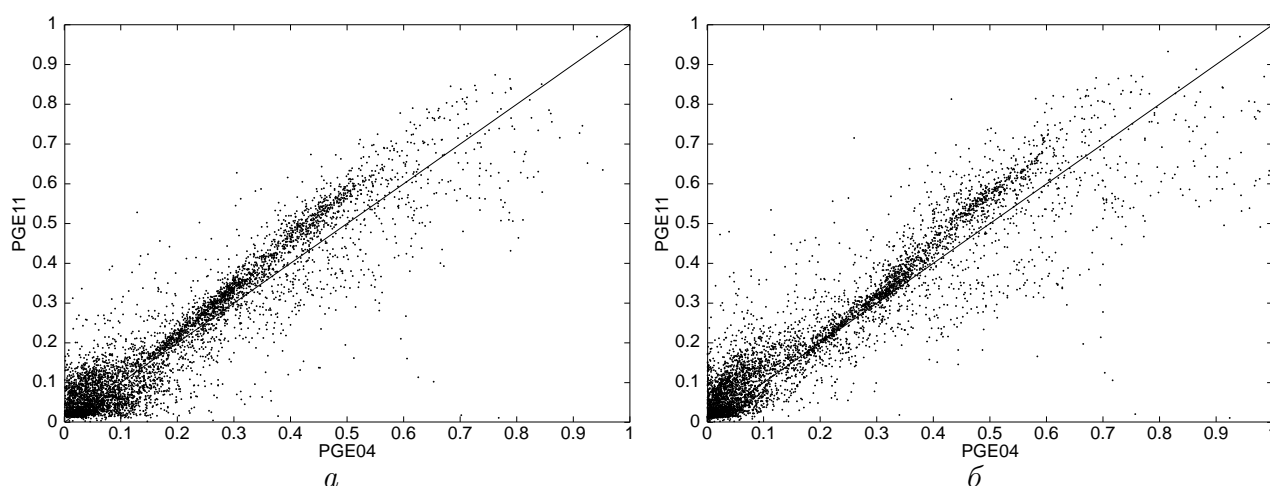


Рис. 7. Сопоставление значений аэрозольной оптической толщины, полученных в данной работе по алгоритму PGE11 [54], с АОТ алгоритма PGE04 [44]: АОТ на длинах волн 0.47 мкм (а) и 0.66 мкм (б).

рекции. Как видно из рис. 6, включение в алгоритм на этапе поиска темных пикселей дополнительного условия $\rho(1.24)/\rho(0.87) > 1.35$ позволяет исключить из обработки пиксели, для которых соотношения $\rho_s(0.66) = \rho(2.13)/2$, $\rho_s(0.47) = \rho(2.13)/4$ не выполняются. По мнению авторов, включение этого дополнительного условия в алгоритм восстановления АОТ тропосферного аэрозоля PGE04 приведет к уточнению значений АОТ, восстанавливаемых по данным MODIS.

3.3. Коэффициент спектральной яркости ПП

Сигналы, измеренные прибором космического базирования, не могут сразу использоваться для восстановления КСЯ подстилающей поверхности. Причинами являются как изменение атмосферой сформированного объектом ПП сигнала при его распространении по трассе ПП — спутник и влияние атмосферы на угловое распределение поступающего на этот объект солнечного излучения, так и вклад в показание прибора соседних объектов через многократное рассеяние отраженного излучения — боковой подсвет [55].

Процедуру исключения из показаний спутникового детектора вклада атмосферных процессов принято называть атмосферной коррекцией. Получаемые после коррекции данные как бы соответствуют условиям съемки, когда между прибором и подстилающей поверхностью нет атмосферы. Именно такие, откорректированные на атмосферные эффекты, данные спутникового прибора требуются при мониторинге характеристик ПП.

Хотя уравнение (3) справедливо лишь для однородной ламбертовой поверхности, на данном этапе ежедневного глобального мониторинга характеристик поверхности суши с использованием данных MODIS оно положено в основу операционного алгоритма восстановления КСЯ подстилающей поверхности [54]. Из (3) видно, что по измеренным MODIS для свободного от облачности пикселя $(\theta_l, \vartheta_l, \varphi_l)$ в канале $\Lambda = \Delta\lambda$ КСЯ системы атмосфера — подстилающая поверхность Земли $\rho(\Lambda, \theta_l, \vartheta_l, \varphi_l)$ можно получить приближенную оценку $\rho_s(\Lambda, \theta_l, \vartheta_l, \varphi_l)$, если известны ρ_0 , T^\downarrow , T^\uparrow и $s(\Lambda)$.

Ключевым элементом процедуры коррекции данных MODIS в рассматриваемом при-

ближении является определение АОТ. Это обусловлено не только большим вкладом аэрозоля в показания каналов MODIS в видимом и ближнем ИК-диапазонах, но и отсутствием других оперативных данных по АОТ, которые могли бы использоваться при коррекции на “пиксельном” уровне. В реализованном в настоящее время операционном коде коррекции [54] АОТ восстанавливается для каждого пикселя с разрешением 1 км в надире по полученным в процессе съемки интенсивностям MODIS. На этом этапе коррекции также используются справочные таблицы, построенные для различных типов аэрозолей и геометрий наблюдения с применением кода 6S [56].

Результатом многоэтапной обработки данных MODIS при проведении атмосферной коррекции, включая поиск очагов пожаров, оценку АОТ дымовых шлейфов и учет их влияния на показание прибора, являются значения коэффициента спектральной яркости подстилающей поверхности в первых семи каналах.

3.4. Двухнаправленный коэффициент спектральной яркости и альbedo подстилающей поверхности

Период повторения орбит спутника Тегга составляет 16 дней. В каждый цикл наблюдений некоторая зона поверхности Земли наблюдается MODIS при различных углах $(\theta, \vartheta, \varphi)$. В силу этого откорректированные на атмосферные эффекты данные MODIS в каждом цикле наблюдений могут быть использованы для восстановления усредненных двухнаправленных коэффициентов спектральной яркости и последующего определения альbedo ПП по алгоритму [57].

Процедура восстановления базируется на утверждении, что линейная комбинация индикатрис изотропного рассеивания $K_{\text{изо}}$, оптико-геометрической модели $K_{\text{гео}}$ и расчетные данные в рамках теории переноса $K_{\text{тп}}$, дополняющие друг друга в описании прохождения квантов солнечного излучения через однородные и неоднородные растительные покровы, позволяют удовлетворительно моделировать ДКСЯ ПП (см., например, работы [57–61] и приведенную в них библиографию).

В операционном алгоритме для MODIS [57] ДКСЯ ПП представляется в виде

$$R_s(\Lambda, \theta, \vartheta, \varphi) = f_1(\Lambda)K_{\text{изо}} + f_2(\Lambda)K_{\text{тп}}(\theta, \vartheta, \varphi) + f_3(\Lambda)K_{\text{гео}}(\theta, \vartheta, \varphi), \quad (5)$$

где коэффициенты разложения $f_k(\Lambda)$ являются параметрами, которые необходимо определить по результатам спутниковых наблюдений. Если $\rho_s(\Lambda, \theta_l, \vartheta_l, \varphi_l)$, $l = 1, \dots, m$, — КСЯ ПП, полученные по результатам m спутниковых измерений в течение 16-дневного цикла, то, минимизируя значение квадратичной ошибки

$$e_\Lambda^2 = \frac{1}{d} \sum_{l=1}^m \frac{(\rho_s(\Lambda, \theta_l, \vartheta_l, \varphi_l) - R_s(\Lambda, \theta_l, \vartheta_l, \varphi_l))^2}{w_{\Lambda,l}}, \quad (6)$$

нетрудно определить $f_k(\Lambda)$. В выражении (6) $d = m - 3$ — число степеней свободы, $w_{\Lambda,l}$ — вес, присвоенный измерению $\rho_s(\Lambda, \theta_l, \vartheta_l, \varphi_l)$.

После определения f_k и восстановления ДКСЯ ПП по (5), можно вычислить плоское $a_\Lambda^{\text{пл}}(\theta)$ и сферическое $a_\Lambda^{\text{сф}}$ альbedo:

$$a_\Lambda^{\text{пл}}(\theta) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\vartheta R_s(\Lambda, \theta, \vartheta, \varphi) \sin \vartheta \cos \vartheta, \quad a_\Lambda^{\text{сф}} = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta a_\Lambda^{\text{пл}}(\theta) \sin \theta \cos \theta.$$

Реальное спектральное альbedo $a_{\Lambda}(\theta)$ подстилающей поверхности представляет собой суперпозицию [47, 57]

$$a_{\Lambda}(\theta) = [1 - S(\theta, \tau_{\lambda})] a_{\Lambda}^{\text{пл}}(\theta) + S(\theta, \tau_{\lambda}) a_{\Lambda}^{\text{сф}},$$

где $S(\theta, \tau_{\lambda})$ — доля диффузионного излучения в падающем на ПП потоке, которая определяется в основном оптической толщиной атмосферы τ_{λ} .

4. Технологии оперативного мониторинга

Операционные алгоритмы восстановления ряда геофизических параметров системы атмосфера — подстилающая поверхность по данным спектрорадиометра MODIS предполагают использование дополнительных (не измеряемых MODIS) метеорологических данных. Алгоритмами предусмотрено, что, например, давление на поверхности Земли, температура воздуха на высоте 2 м, скорость ветра на высоте 10 м забираются при обработке данных MODIS из GDAS, создаваемых на сроки 00, 06, 12 и 18 часов на сетке $1 \times 1^{\circ}$ в NCEP (National Center for Environmental Prediction) — Национальном центре прогнозирования окружающей среды США. В кодах, реализующих эти алгоритмы, необходимые параметры для анализируемого пикселя находят простым интерполированием по пространственным и временной переменным.

Понятно, что GDAS на определенный срок появляется с некоторой задержкой. Это обусловлено тем, что требуется некоторое время для усвоения всех потоков данных, полученных в результате измерения параметров атмосферы метеорологическими станциями, радиозондами, самолетными и спутниковыми приборами. Внешние пользователи получают GDAS на определенный срок с еще большей задержкой. Так в Центр космического мониторинга эти данные из [62] поступают в настоящее время с задержкой, превышающей 6 ч. Понятно, что такая задержка исключает возможность оперативной обработки данных MODIS, принимаемых в Центре на свою станцию приема в режиме реального времени.

Решение этой проблемы авторы видят (см., например, [63, 64]) во включении в вычислительный комплекс оперативной обработки данных MODIS/(Terra+ Aqua) результатов GFS или прогнозных данных мезомасштабной модели пятого поколения MM5 [65]. Исследования показали, что 12-часовой прогноз GFS или MM5 при стартах в 18:00 UTC и 06:00 UTC позволяет получить данные, необходимые для оперативной обработки спутниковой информации как утренних, так и вечерних витков. Для реализации этого подхода потребовалась модификация ряда пакетов PGE.

5. Перечень продуктов, создаваемых по данным MODIS

Перечень продуктов, создаваемых в центре космического мониторинга Алтайского государственного университета и Главном управлении МЧС по Алтайскому краю по данным MODIS, приведены в табл. 5. Поскольку в программе EOS/NASA продукты MODIS/Terra и MODIS/Aqua принято обозначать соответственно как MODnn и MYDnn, то в таблице при указании идентификационного кода продуктов MODIS/Terra и MODIS/Aqua для сокращения записи авторы используют написание MxDnn.

Таблица 5. Перечень продуктов, создаваемых по данным MODIS

№ п/п	Характеристика продукта	Код продукта	Разрешение в надире, км	Используемый пакет	Алгоритм
1	Калиброванные интенсивности: каналы 1–2; каналы 1–7; каналы 1–36	MxD02QKM MxD02HKM MxD021KM MxD02OBC	0.25 0.5 1	PGE02 /IMAPP	[23, 27]
2	Маска облачности	MxD35_L2	0.25 1	PGE03	[66, 67]
3	Характеристики атмосферы (профили температуры, влажности, общее количество водяного пара и озона, температура подстилающей поверхности)	MxD07_L2	5	PGE03	[37]
4	Параметры облаков	MxD06_L2	1	PGE06	[67]
5.	Вертикальный профиль озона	—	5	PGE03M	[37, 68]
6	Маска снежного покрова	MxD10_L2	0,5	PGE07	[69, 70]
7	Общее количество водяного пара в атмосфере	MxD05_L2	1	PGE04	[71, 72]
8	Характеристики тропосферного аэрозоля над поверхностью суши	MxD04_L2	10	PGE04	[44, 46]
9	Коэффициент спектральной яркости ПП в каналах 1–7, NDVI	MxD09 MxD09CRS	0.25 0,5 1 5 0.25	PGE11	[73, 54]
10	Аэрозольная оптическая толщина атмосферы над поверхностью суши	MxD09	1	PGE11	[54]
11	Термальные аномалии, пожары	MxD14_L2 MxD09	1	PGE30 PGE11	[54, 74, 75]
12	Температура подстилающей поверхности	MxD11_L2 MxD11A1 MxD11B1	1 5	PGE16	[76, 77]
13	Двунаправленный коэффициент спектральной яркости, плоское и сферическое альbedo, коэффициент спектральной яркости, приведенный к надирной геометрии	MxD43B1 MxD43B2 MxD43B3 MxD43B4 MxD43B4C	1 5	PGE12 PGE13 PGE22 PGE23	[57, 58]

Заключение

Уточнение знаний о динамике поведения Земли как системы, вычленение и оценка основных факторов — естественных и антропогенных, определяющих ее современное состояние, а также прогнозирование характеристик системы на различные сроки в различных регио-

нах в настоящее время возможны лишь при использовании результатов моделирования в рамках глобальных и региональных климатических моделей. Требуемые для старта этих моделей данные по “критическим” параметрам каждой оболочки Земли поставляются приборами, вынесенными на космические платформы.

Вывод на орбиту спутника Terra с 36-канальным спектрорадиометром MODIS позволил центру космического мониторинга Алтайского госуниверситета и ГУ МЧС по Алтайскому краю в 2002 году начать мониторинговые наблюдения ряда критических параметров системы атмосфера — подстилающая поверхность Земли на количественном уровне.

В данной работе описаны математические технологии, используемые в центре космического мониторинга при восстановлении характеристик атмосферы и ПП по данным MODIS/(Terra+Aqua). Обсуждаются все этапы мониторинга — от момента приема “сырого” потока данных прибора в центре до создания продуктов, включая математические модели, алгоритмы и вычислительные пакеты, новые технологии оперативного мониторинга. Показывается, что сегодня возможны измерение основных параметров атмосферы, включая АОТ, осуществление атмосферной коррекции, когда из показаний MODIS исключается вклад атмосферных процессов, получение данных о подстилающей поверхности.

Пятилетний ряд калиброванных интенсивностей MODIS, поступающая ежедневно оперативная информация вместе с реализованными математическими технологиями обработки данных представляют собой важный информационный ресурс для современных исследований климатических изменений в Сибири.

Авторы выражают благодарность академику РАН Ю.И. Шокину за предложение подготовить обзорную работу по математическим технологиям спутникового мониторинга и обсуждение ряда вопросов, затронутых в данной статье, во время его посещения центра космического мониторинга Алтайского госуниверситета. Авторы благодарят также сотрудников лаборатории DRL (Direct Readout Lab, GSFC/NASA) за представленные базовые алгоритмы PGE 02–04, 06, 07, 11–13, 16, 22, 23.

Список литературы

- [1] INTERGOVERNMENTAL panel on climate change: Technical report. Cambridge: Climate Change 2001 — The Scientific Basis (contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Cambridge Univ. Press., 2001.
- [2] RAMANATHAN V., CRUTZEN P.J., KIEHL J.T., ROSENFELD D. Aerosols, climate and the hydrological cycle // Science. 2001. Vol. 294. P. 2119–2124.
- [3] HANSEN J., SATO M., RUEDY R. ET AL. Efficacy of climate forcings // J. Geophys. Res. — Atmospheres. 2005. Vol. 110, N D1.8D18104. doi:10.1029/2005JD005776.
- [4] ЗУЕВ В.В. Некоторые приоритеты междисциплинарных климатологических исследований в Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 704–705.
- [5] РЕГИОНАЛЬНЫЙ мониторинг атмосферы / М.Ф. Адаменко, Н.М. Алехина, В.П. Горбатенко и др. / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: РАСКО, 2000. Ч. 4. 270 с.
- [6] HANSEN J., SATO M., RUEDY R. ET AL. Global temperature change // PNAS. 2006. Vol. 103. P. 14288–14293.

- [7] КОНДРАТЬЕВ К.Я. Возможности получения информации о параметрах климата по данным американских спутников оперативного назначения // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5, № 7. С. 744–750.
- [8] LI Z., GARAND L. Estimation of surface albedo from space: a parametrization for global application // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99, N D4. P. 8335–8350.
- [9] SELLERS P.J., MEESON B.W., HALL F.G. ET AL. Remote sensing of the land surface for studies of global change: models algorithms experiments // Remote Sens. Environ. 1995. Vol. 51. P. 3–26.
- [10] OHRING G., LORD S., DERBER J. ET AL. Applications of satellite remote sensing in numerical weather and climate prediction // Adv. Space Res. 2002. Vol. 30, N 11. P. 2433–2439.
- [11] AUMANN H.H., CHAHINE M.T., GAUTIER C. ET AL. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. Vol. 41, N 2. P. 253–264.
- [12] SUSKIND J., BARNET C.D., BLAISDELL J.M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. Vol. 41, N 2. P. 390–409.
- [13] SCIENCE writer's guide to Terra: Technical report. NASA's Earth Science Enterprise. NASA Headquarters. Washington, DC 20546: Earth observing system project science office, 1999.
- [14] SAVTCHENKO A., OUZOUNOV D., AHMAD S. ET AL. Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC // Adv. Space Res. 2004. Vol. 34, N 4. P. 710–714.
- [15] SALOMONSON V.V., BARNES W.L., MAYMON P.W. ET AL. MODIS: Advanced facility instrument for studies of the earth as a system // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1989. Vol. 27, N 2. P. 145–153.
- [16] <http://www.scanex.ru/ru/site/stations/default.asp?submenu=eoscan&id=index>
- [17] PARKINSON C.L. Aqua: an earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. Vol. 41, N 2. P. 173–183.
- [18] KAWANISHI T., SEZAI T., ITO Y. ET AL. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. Vol. 41, N 2. P. 184–194.
- [19] БЕЛОЛИПЕЦКИЙ В.М., ШОКИН Ю.И. Математическое моделирование в задачах охраны окружающей среды. Новосибирск: ИНФОЛИО-пресс, 1997. 240 с.
- [20] TOWNSHEND J.R.G., JUSTICE C.O. Towards operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing // Remote Sens. Environ. 2002. Vol. 83. P. 351–359.
- [21] DB Meeting 2005. http://dbmeeting.gsfc.nasa.gov/posters_presentations.cfm
- [22] CORONADO P., KANNENBERG B. International EOS/NPP direct redout meeting 2005 // Earth Observer. 2006. Vol. 18. P. 16–17.
- [23] BARNES W.L., XIONG X., SALOMONSON V.V. Status of Terra MODIS and Aqua MODIS // Adv. Space Res. 2003. Vol. 32, N 11. P. 2099–2106.
- [24] <http://www.space-track.org>

- [25] INTERNATIONAL MODIS/AIRS Processing Package (IMAPP).
<http://cimss.ssec.wisc.edu/~gumley/IMAPP/IMAPP.html>
- [26] WOLFE R.E., NISHIHAMA M., FLEIG A.J. ET AL. Achieving sup-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science // *Remote Sens. Environ.* 2002. Vol. 83. P. 31–49.
- [27] GUENTHER B., GODDEN G.D., XIONG X. ET AL. Prelaunch algorithm and data format for Level 1 calibration products for EOS_AM1 moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1998. Vol. 36. P. 1142–1151.
- [28] XIONG X., BARNES W.L., GUENTHER B., MURPHY R.E. Lessons learned from MODIS // *Adv. Space Res.* 2003. Vol. 32, N 11. doi:10.1016/S0273-1177(03)00681-1.
- [29] TOBIN D.C., REVERCOMB H.E., MOELLER C.C., PAGANO T.S. Use of Atmospheric Infrared Sounder high-spectral resolution spectra to assess the calibration of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on EOS Aqua // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, N D09S05. doi:10.1029/2005JD006095.
- [30] http://directreadout.gsfc.nasa.gov/download_technology/inst_algorithms.cfm
- [31] <http://www.hdfgroup.org/>
- [32] <http://www.hdfeos.org/>
- [33] <http://tcl-nap.sourceforge.net/>
- [34] <http://www.itvis.com/idl/>
- [35] http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/misr/tools/misr_hdf_bin_tool.html
- [36] <http://nsidc.org/data/hdfeos/hdfeos2bin.html>
- [37] SEEMANN S.W., LI J., MENZEL W.P., GUMLEY L.E. Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture and ozone from MODIS infrared radiances // *J. Appl. Meteor.* 2003. Vol. 42, N 8. P. 1072–1091.
- [38] АЭРОЗОЛЬ и климат / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 542 с.
- [39] KING M.D., KAUFMAN Y.J., TANRE D., МАКАЈИМА Т. Remote sensing of tropospheric aerosol from space: past, present and future // *Bull. Amer. Meteor. Society.* 1999. Vol. 80, N 11. P. 2229–2259.
- [40] HAYWOOD J., BOUCHER O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review // *Rev. Geophys.* 2000. Vol. 38. P. 513–543.
- [41] KAUFMAN Y.J., TANRE D., BOUCHER O. A satellite view of aerosols in climate system // *Nature.* 2002. Vol. 419. P. 215–223.
- [42] КОНДРАТЬЕВ К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Свойства аэрозоля различных типов // *Оптика атмосферы и океана.* 2004. Т. 17. С. 5–24.
- [43] СУШКЕВИЧ Т.А. Математические модели теории переноса. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 661 с.
- [44] KAUFMAN Y.J., TANRE D., REMER L.A. ET AL. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over-land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, N D14. P. 17051–17067.

- [45] CHU D.A., KAUFMAN Y.J., ZIBORDI G. ET AL. Global monitoring of air pollution over land from Earth Observing System — Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, N D21. doi:10.1029/2002JD003179.
- [46] REMER L.A., KAUFMAN Y.J., TANRE D. ET AL. The MODIS aerosol algorithm, products and validation // J. Atmos. Sci. 2005. Vol. 62, N 4. P. 947–973.
- [47] МИНИН И.Н. Теория переноса излучения в атмосферах планет. М.: Наука, 1988. 264 с.
- [48] VERMOTE E.F., VERMENLEN A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS/ATBD/atbd_mod08.pdf
- [49] KAUFMAN Y.J., WALD A., REMER L.A. ET AL. Remote sensing of aerosol over the continents with the aid of a 2.2 μm channel // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1997. Vol. 36. P. 1286–1298.
- [50] REMER L.A., KAUFMAN Y.J. Dynamic aerosol model: urban/industrial aerosol // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103, N D12. P. 1385–1387.
- [51] HOLBEN B.N., ECK T.F., SLUTSKER I. ET AL. AERONET — a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote. Sens. Environ. 1998. Vol. 66(1). P. 1–16.
- [52] AEROSOL Robotic Network (AERONET) Homepage. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>
- [53] CHU D.A., KAUFMAN Y.J., ICHOKU C. ET AL. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land // Geophys. Res. Lett. 2002. Vol. 29, N 8007. doi:10.1029/2001GL013205.
- [54] VERMOTE E.F., SALEOUS N. S. EL., JUSTICE C.O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results // Remote Sens. Environ. 2002. Vol. 83. P. 97–111.
- [55] ЗУЕВ В.Е., БЕЛОВ В.В., ВЕРЕТЕННИКОВ В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Изд-во “Спектр” Института оптики атмосферы СО РАН, 1997. 402 с.
- [56] VERMOTE E.F., TANRE D., DEUZE J.L. ET AL. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: An overview // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1997. Vol. 35. P. 675–686.
- [57] LUCHT W., SCHAAF C.B., STRAHLER A.H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2000. Vol. 38, N 2. P. 977–998.
- [58] SCHAAF C.B., GAO F., STRAHLER A.H. ET AL. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS // Remote Sens. Environ. 2002. Vol. 83. P. 135–148.
- [59] ROUJEAN J.L., LERON M., DESCHAMPS P.Y. A bidirectional reflectance model of the earth’s surface for the correction of remote sensing data // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97, N D18. P. 20455–20468.
- [60] WANNER W., LI X., STRAHLER A.H. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100, N D10. P. 21 077–21 089.
- [61] МАТЕМАТИЧЕСКОЕ моделирование переноса радиации в растительных средах / Ю. Росс, Ю. Князихин, А. Кууск и др. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 200 с.
- [62] SSEC Direct Broadcast Data. <http://aqua.ssec.wisc.edu/>

- [63] БУГАЕВ В.В., ЛАГУТИН А.А., ЛАГУТИН А.А., НИКУЛИН Ю.А. Применение мезомасштабной модели ММ5 для прогнозирования метеорологических параметров атмосферы Алтая // Матер. 6-го Сиб. совещ. по климато-экологич. мониторингу. Томск, 2005. С. 471–474.
- [64] ЛАГУТИН А.А., ЛАГУТИН А.А., НИКУЛИН Ю.А. Оперативное восстановление параметров атмосферы и подстилающей поверхности с использованием данных MODIS и прогнозных метеорологических полей моделей ММ5/WRF // Матер. 2-й Междунар. конф. “Земля из космоса — наиболее эффективные решения”. М., 2005. С. 199–200.
- [65] GRELL G., DUDHIA J., STAUFFER D. A Description of the Fifth Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5): Technical Report: NCAR Tech. Note, TN-398+STR, 1994. <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>
- [66] ACKERMAN S.A., STRABALA K.I., MENZEL W.P. ET AL. Discriminating clear sky from cloud with MODIS // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103, N D24. P. 32141–32157.
- [67] KING M.D., MENZEL W.P., KAUFMAN Y.J. ET AL. Cloud and aerosol properties, precipitable water and profiles of temperature and water vapor from MODIS // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. Vol. 41, N 2. P. 442–458.
- [68] LAGUTIN A.A., NIKULIN YU.A., ZUEV V.V. ET AL. Monitoring of atmospheric ozone profile over Siberian Region using MODIS data // SPIE. 2005. Vol. 6160. P. 451–459.
- [69] HALL D.K., RIGGS G.A., SALOMONSON V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sens. Environ. 1995. Vol. 54. P. 127–140.
- [70] HALL D.K., RIGGS G.A., SALOMONSON V.V. ET AL. MODIS snow-cover products // Remote Sens. Environ. 2002. Vol. 83. P. 181–194.
- [71] GAO B.-C., KAUFMAN Y.J. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1992. Vol. 30. P. 871–884.
- [72] GAO B.-C., KAUFMAN Y.J. Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, N D13,4389. doi:10.1029/2002ID003023.
- [73] VERMOTE E.F., SALEOUS N.EL., JUSTICE C.O. ET AL. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102, N D14. P. 17131–17141.
- [74] JUSTICE C.O., GIGLIO L., KORONTZI S. ET AL. The MODIS fire products // Remote Sens. Environ. 2002. Vol. 83. P. 244–262.
- [75] JUSTICE C.O., TOWNSHEND J.R.G., VERMOTE E.F. ET AL. An overview of MODIS Land data processing and product status // Remote Sens. Environ. 2002. Vol. 83. P. 3–15.
- [76] WAN Z., LI Z.-L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1997. Vol. 35, N 4. P. 980–996.
- [77] WAN Z., ZHANG Y., ZHANG Q., LI Z.-L. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data // Remote Sens. Environ. 2002. Vol. 83. P. 163–180.