

MODIS – уникальный опыт мониторинга Земли из космоса

Саворский В.П., Лупян Е.А.

Москва

2025

Завершение работы MODIS

Сообщения о завершении миссий NASA TERRA разместила на своем сайте группа MODIS Land Team. Как сообщила группа (<https://modis-land.gsfc.nasa.gov/news.html>), спутник Terra планово вышел из состава спутников «Утреннего созвездия» Earth Science в октябре 2022 года. Это было вызвано нехваткой топлива на борту. Последний маневр миссии Terra для поддержания среднего местного времени (MLT) для выполнения наблюдений в 10:30 GMT был выполнен 27 февраля 2020 года. С этого момента спутник Terra начал медленно дрейфовать со своего штатного MLT и в октябре 2022 года вышел из созвездия с высотой орбиты 694 км при в 10:15 GMT. Terra MODIS останется в рабочем состоянии и будет генерировать полный набор продуктов до конца миссии в декабре 2025 года.

Аналогичным образом, группа по управлению полетами спутника NASA AQUA реализовала последние маневры миссии, связанные с поддержанием MLT в 13:30 и высоты орбиты 705 км 18 марта 2021 года. В июле 2021 года спутник Aqua начал дрейфовать к более позднему MLT. В январе 2022 года спутник Aqua начал свой выход из созвездия Earth Science. MLT превысил время наблюдений в 13:45 GMT в феврале 2023 года. MLT продолжает увеличиваться до 13:50 GMT в августе 2026 года. Aqua MODIS останется в рабочем состоянии и будет генерировать полный набор продуктов до конца миссии в августе 2026 года.

Число публикаций

Использование продуктов MODIS и число публикаций,
подготовленных на их основе,
беспрецедентно (>22000)
среди научных программ НАСА
https://modis.gsfc.nasa.gov/sci_team/pubs/).

Особенности использования данных MODIS

- Открытый бесплатный доступ к исходным спутниковым данным и продуктам их обработки
- Широкий спектр (многоканальность) исходных данных в видимом, ближнем, среднем и тепловом ИК диапазонах.
- Продолжительность измерений и как следствие возможность создания многолетних однородных рядов исходных данных и их продуктов
- Большая номенклатура стандартных продуктов
- Высокое качество калибровки данных
- Скорость доступа к оперативным данным
- Глубины обработки данных
- Наличие и возможности использования библиотек обработки данных (PDE), созданных и постоянно обновляемых (модернизируемых) по мере накопления опыта работы с данными MODIS

Распространение данных MODIS

Данные MODIS доступны в **режиме близком к реальному времени (NRT)** через систему NASA Land, Atmosphere Near real-time Capability for Earth observation (LANCE), как правило, не более чем через 60÷125 минут после проведения спутникового наблюдения. Доступные через LANCE продукты MODIS включают температуру поверхности земли, отражательную способность поверхности земли, излучение, облака/аэрозоли, водяной пар, активные пожары, снежный покров и морской лед. В настоящее время средствами генерации продуктов NRT MODIS производится около 930 ГБ данных в день (<https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/modis/near-real-time-data>).

Экспериментальные возможности, создаваемые NASA, как показал опыт разработки и использования MODIS, оказались весьма полезными для повышения оперативных возможностей различного рода служб, осуществляющих контроль состояния природных ресурсов Земли из космоса.

Высокая производительность генерации данных

При формировании проектных заданий на аппаратуру MODIS было запланировано производство и архивация более 200 ГБ наземных продуктов MODIS в день. Поскольку на их производство планировалось затратить не менее 50% всех вычислительных ресурсов, то всего ежедневно было запланировано производить не более 400 ГБ данных в день.

В настоящее время средствами генерации продуктов MODIS, предназначенных для доступа в режиме близком к реальному времени, производится около 930 ГБ данных в день. Т.о. в настоящее время интенсивность генерации только оперативных данных в основных центрах обработки EOSDIS примерно в 2,3 превышает планируемый в 1998г общий объем данных.

Открытый бесплатный доступ к продуктам ДЗЗ

Данные MODIS распространяются бесплатно через систему архивации и распространения данных уровня 1 и атмосферы (LAADS). Используя инструмент поиска и упорядочивания на веб-сайте LAADS, можно искать и сортировать данные по коллекции, дате и времени, географическому региону, научным продуктам и выбранным метаданным.

Пользователи с соответствующей антенной для приема космических данных х-диапазона могут получать региональные данные непосредственно с космических платформ Terra и Aqua, используя сигнал MODIS Direct Broadcast. Уникальной особенностью MODIS является его режим Direct Broadcast, заключающийся в непосредственном широковещании исходных («сырых») данных с тем, чтобы любой потребитель на Земле мог зарегистрировать этот передаваемый сигнал на свою antennу. Передача осуществляется в непрерывном режиме, а прием и использование данных не требует оплаты. Широковещание MODIS начато с КА Terra 24 апреля 2000, а с КА Aqua 12 июля 2002.

Характеристики MODIS

Характеристики платформы:	Наклонение -- 98 ⁰ Период обращение -- 99 мин Большая полуось -- 7085 км Эксцентриситет – 0,0015 Период повторяемости орбиты -- 16 дней Квази повторяемость -- 2 дня
Орбита:	705 км, 10:30 нисходящий виток (Terra) или 13:30 р.т. восходящий виток (Aqua), солнечно-синхронная, высокополярная, круговая
Частота сканирования:	20,3 скана в минуту, линейно-поперечное
Размеры полосы захвата:	2330 км (поперечно плоскости орбиты) на 10 км вдоль плоскости орбиты)
Телескоп:	Диаметр 17,78 см
Квантование:	12 бит
Пространственное разрешение:	250 м (каналы 1-2) 500 м (каналы 3-7) 1000 м (каналы 8-36)
Объявленный срок функционирования:	6 лет

Основные объекты наблюдения каналов видимого и ближнего ИК диапазонов Terra MODIS

Объект наблюдений	№ канала	Спектральный диапазон	Спектральная плотность яркости излучения [Дж/м ² ·мкм·срад]	Требуемое отношение сигнал/шум
Суша/Облака/Границы аэрозолей	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Суша/Облака/Свойства аэрозолей	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
Цветность океана/ Фитопланктон/ Биогеохимия	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
	17	890 - 920	10.0	167
Содержание водяного пара в атмосфере	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15.0	250
	26	1.360 - 1.390	6.00	150

Калибровка MODIS - I

Поскольку спектрорадиометр MODIS был создан для мониторинга суши, атмосферы и океанов Земли в рамках научно-исследовательских работ, при разработке значительное внимание было уделено его калибровке (Xiong, Barnes, 2006; Xiong et al., 2007).

MODIS оснащен системой калибровки с высокоиз качественным черным телом, солнечным диффузором, монитором стабильности работы диффузора и спектрально-радиометрическим устройством калибровки (Pedelty et al., (2007)).

В совокупности калибровочная подсистема MODIS была призвана обеспечивать абсолютную точность калибровки не хуже 2% в видимом и нетепловом ИК диапазонах и 0,7% в длинноволновом в тепловом ИК диапазоне (Xiong et al., 2003) (по данным предполетных тестов).

Калибровка MODIS - II

Однако, уже к началу 2003 года, т.е. менее чем за 2,5 года эксплуатации на орбите, была установлено снижение чувствительности сенсоров отдельных каналов спектрорадиометра MODIS, особенно значительное, достигающее 5 раз, в тепловых ИК каналах(Xiong et al., 2003). Но, что еще более важно, были обнаружены существенные изменения излучательных характеристик солнечного диффузора, до 20% в коротковолновом канале 412 нм примерно за 750 дней эксплуатации (Xiong et al., 2003). Деградация бортовых устройств калибровки была впоследствии подтверждена результатами, приведенными в публикации (Xiong et al., 2006).

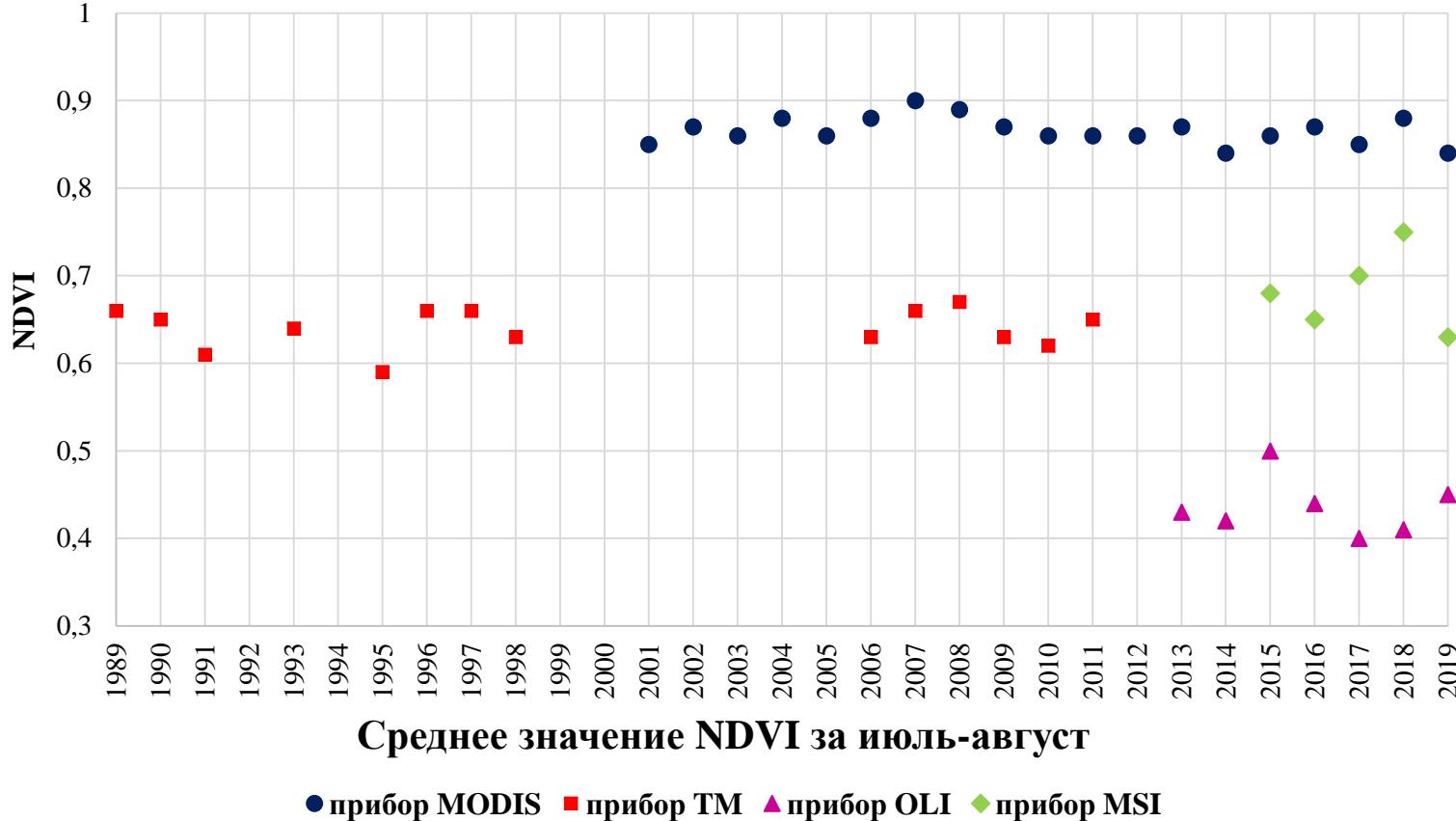
Калибровка MODIS – III

- I. Для обеспечения точности процедур внутренней калибровки в (Xiong et al., 2006) было предложено использовать внешнюю калибровку MODIS, в частности наблюдение Луны как стабильного эталонного источника отраженной солнечной радиации (Kieffer, Wildey, 1996; Xiong et al., 2010).
- II. Дополнительно к использованию отраженного излучения Луны в (Xiong et al., 2006) было предложено использовать косвенную калибровку (*vicarious calibration*) (Wan et al., 1999), базирующуюся на измерениях отраженного солнечного излучения от наземных полигонов с известными отражательными характеристиками. Однако следует заметить, что применение *vicarious calibration* существенно ограничено тем, что наряду с известными радиационными характеристиками поверхности Земли он предполагает наличие информации о радиационных характеристиках атмосферного столба над калибровочными

Калибровка MODIS – IV

- I. Необходимость проведения атмосферной коррекции отсутствует при использовании объектов, расположенных выше тропосфера. Одним из таких объектов является верхняя граница облачного слоя над участками т.н. глубокой конвекции, на которых в результате интенсивных воздушных конвективных потоков влажный воздух тропосферы пронизывает весь слой тропосферы и достигает тропопаузы, т.е. высот более 10 км над поверхностью Земли. Формирующийся при этом щит ледовых облаков, т.н. мезомасштабная система глубокой конвекции (МСГК), обладает стабильными однородными в широком оптическом диапазоне характеристиками, что позволило рекомендовать использование МСГК в качестве природных эталонов для калибровки спутниковых оптических приборов (Vermote, Kaufman, 1995; Boer, Ramanathan, 1997; Doelling et al., 2004). В работах (Doelling et al. 2010, 2011, 2013; Bhatt, 2017) описано использование МСГК для проверки и коррекции внутренних калибровочных эталонов MODIS

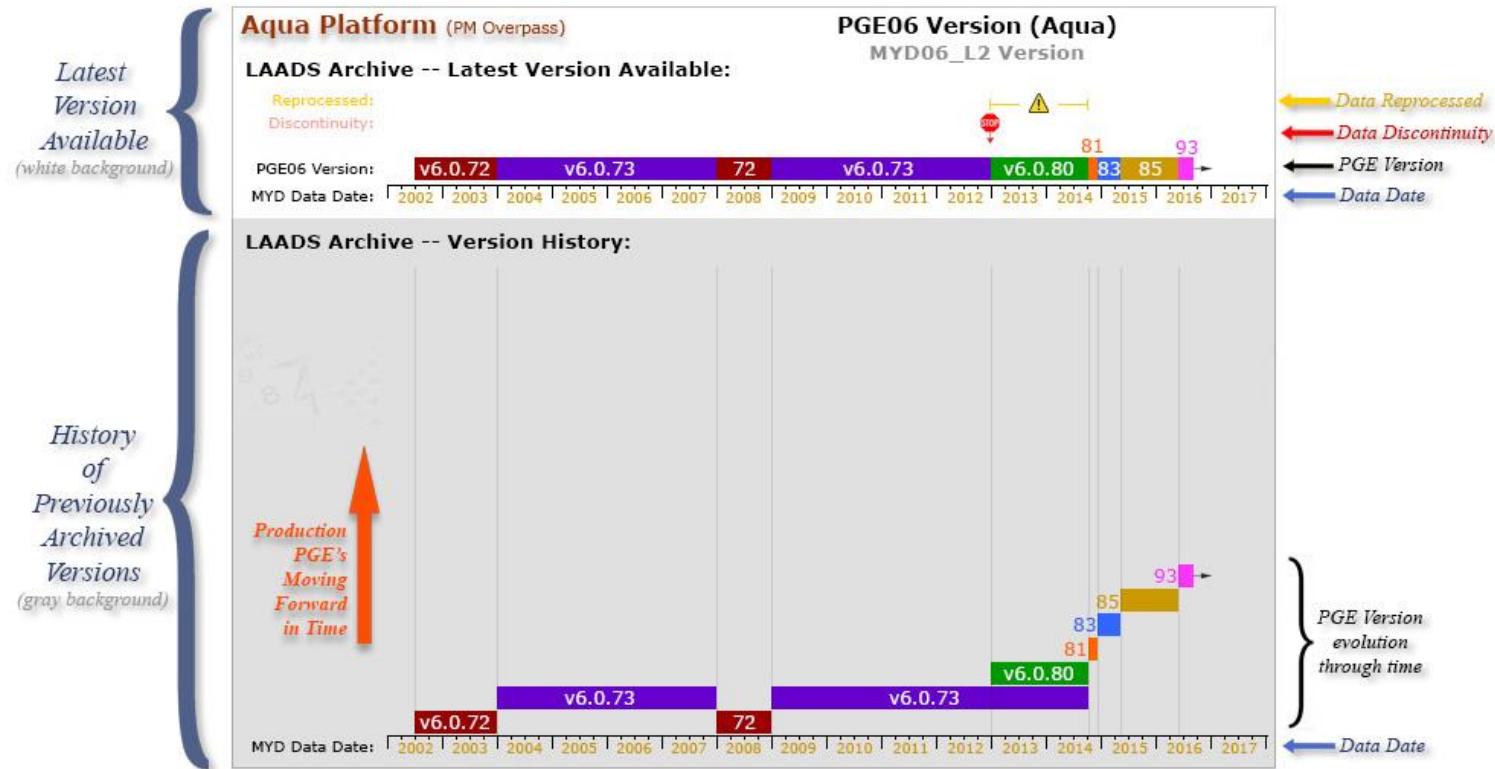
Однородные ряды NDVI



Однородный участок бересы площадью 208 га, расположенный в 15 км от города Качканар, Свердловская область.

Наличие и возможности использования библиотек обработки данных (PDE), созданных и постоянно обновляемых (модернизируемых) по мере накопления опыта работы с данными MODIS.

Key To Understanding the PGE Version Graphics:



Состав научных алгоритмов программы MODIS

Program Executable (PGE) (aka. science algorithm)

(e.g. see for atmosphere products http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/products_calendar.html)

PGE	PGE's description	MOD
PGE 01	PGE01 converts raw (Level 0) data into reconstructed earth-located instrument (Level 1A) data.	MOD01, MOD03
PGE 02	PGE02 for Terra converts the raw (L1A) detector counts into fully calibrated (Level 1B) radiances .	MOD02
PGE 03	PGE03 for Terra runs the Cloud Mask, Atmospheric Products and Volcano Alert algorithms .	MOD35, MOD07
PGE 04	PGE04 runs the Aerosol Product and Precipitable Water Product algorithms .	MOD04, MOD05
PGE 06	PGE06 runs the Cloud Product algorithm.	MOD06
PGE 07	PGE07 for Terra runs the Level 2 Snow Mapping algorithm	MOD10
PGE 08	PGE08 runs the Level 2 Sea Ice Mapping algorithm.	MOD29
PGE 09	PGE09 runs the Level 2 and Level 3 space binning Ocean Colour algorithms.	
PGE 10	PGE10 runs the Level 2 and Level 3 space binning Sea Surface Temperature algorithms.	MOD28
PGE 11	PGE11 runs the Surface Reflectance algorithm.	MOD09
PGE 12	PGE12 generates the products used to map Level 2 swath data to Level 3 tiled products.	
PGE 13	PGE13 generates the interim products used to create the Level 3 tiled Surface Reflectance and Thermal Anomalies/Fire products from their Level 2 (swath) counterparts .	MOD14
PGE 14	PGE14 generates the interim product used to create the Level 3 tiled Snow Cover product.	MOD10
PGE 15	PGE15 generates the interim product used to create the Level 3 tiled Sea Ice Extent product.	MOD29
PGE 16	PGE16 for Terra runs the Level 2 and Level 3 Land Surface Temperature algorithms.	MOD11
PGE 17	PGE17 generates the preprocessed meteorological data for MODAPS Oceans algorithms.	
PGE 19	PGE19 generates the ancillary ozone column input for MODAPS Oceans processing.	

Состав научных алгоритмов программы MODIS (cont)

PGE 20	PGE20 generates the Level 3 Oceans daily products.	
PGE 21	PGE21 generates the Level 3 Land 8-Day Surface Reflectance product.	MOD09
PGE 22	PGE22 performs the Level 3 daily Land Aggregation processing.	
PGE 23	PGE23 runs the Level 3 16-day Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF)/Albedo processing.	MOD43
PGE 24	PGE24 generates the Level 3 16-day CMG Albedo product.	MOD43
PGE 25	PGE25 generates the Level 3 16-day 250m and 500m gridded Vegetation Indices products.	MOD13
PGE 26	PGE26 runs the Level 3 monthly Vegetation Index processing.	MOD13
PGE 29	PGE29 generates the Level 3 daily and 8-day Thermal Anomalies/Fire products.	MOD14
PGE 30	PGE30 runs the Level 2 Thermal Anomaly/Fire Detection algorithm.	MOD14
PGE 31	PGE31 generates the Level 3 gridded 8-day Land Surface Temperature/Emissivity product.	MOD11
PGE 33	PGE33 generates the Level 4 daily Leaf Area Index/FPAR products.	MOD15
PGE 34	PGE34 generates the Level 4 8-day Leaf Area Index/FPAR products.	MOD15
PGE 35	PGE35 generates the Level 3 16-day (1 km) Vegetation Index products.	MOD13
PGE 36	PGE36 generates the Level 4 daily Net Photosynthesis product.	MOD15
PGE 37	PGE37 generates the Level 4 8-day Net Photosynthesis products.	MOD15
PGE 38	PGE38 generates Level 4 yearly Net Primary Production products.	MOD17
PGE 40	PGE40 generates the Level 3 32-day Land Cover Database products.	MOD12
PGE 41	PGE41 generates the Level 3 yearly gridded Land Cover Type products.	MOD12
PGE 42	PGE42 generates the Level 3 yearly CMG Land Cover product.	MOD12
PGE 43	PGE43 generates the Level 3 gridded daily Snow Cover products.	MOD10
PGE 44	PGE44 generates the Level 3 gridded daily Sea Ice Extent products.	MOD29
PGE 45	PGE45 runs the Level 3 8-day Snow Cover processing.	MOD33

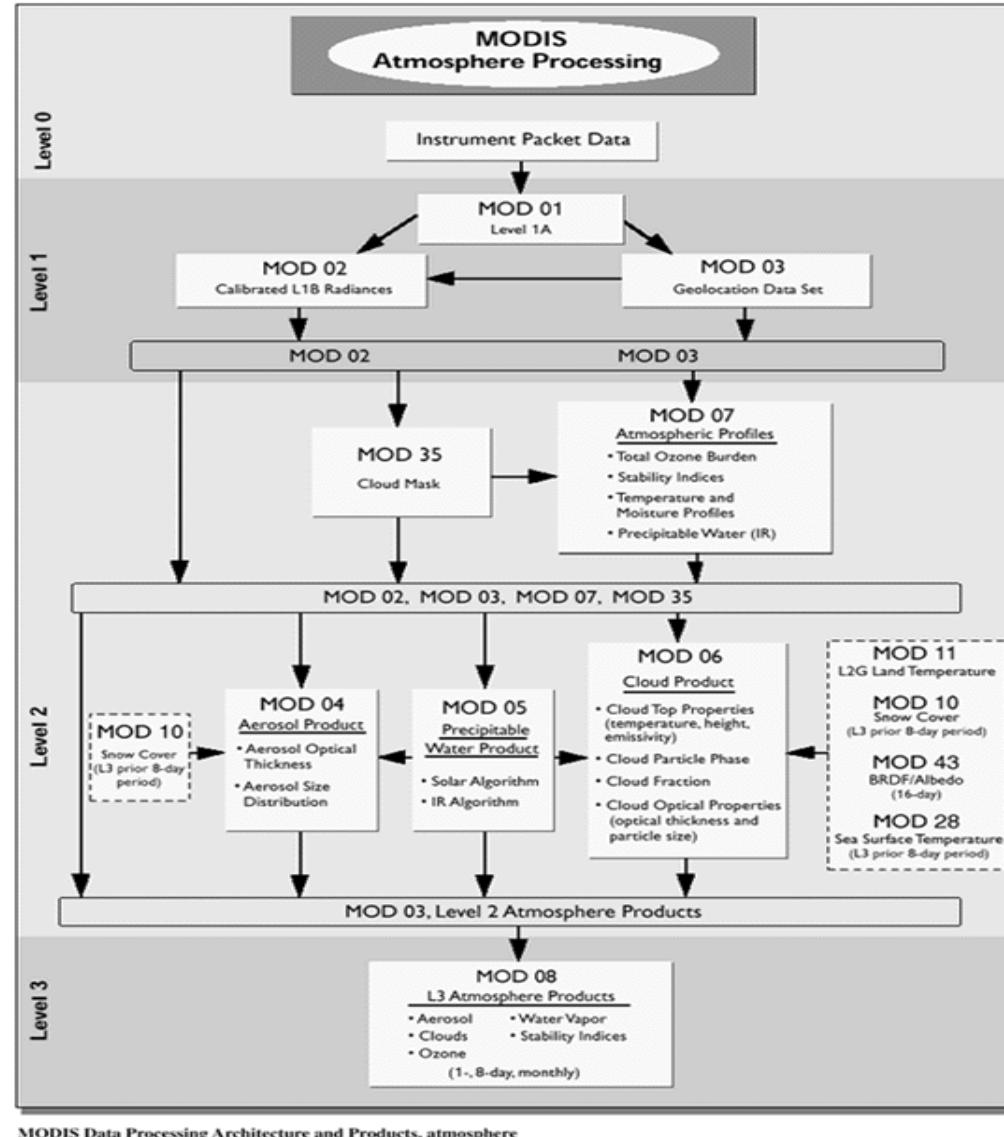
Состав научных алгоритмов программы MODIS (cont)

PGE 46	PGE46 generates the Level L3 daily gridded CMG Snow Cover product.	MOD10
PGE 51	PGE51 for Terra generates the Level 4 8-day Ocean Productivity Indices products.	MOD27
PGE 54	PGE54 runs the Level 3 Oceans 8-day processing.	
PGE 56	PGE56 generates the Daily Level 3 tiled Atmosphere product	MOD08
PGE 57	PGE57 runs the Level 3 calendar Monthly Atmosphere processing.	MOD08
PGE 60	PGE60 performs the Level 2 Geolocation Control Point matching .	
PGE 65	PGE65 generates the Level 3 CMG 16-day BRDF/Albedo product.	MOD43
PGE 66	PGE66 generates Level 3 32-day 250m Vegetation Cover Conversion products.	MOD44
PGE 67	PGE67 generates the Level 3 CMG 8-day gridded Snow Cover product.	MOD33
PGE 69	PGE69 generates the interim products used to create the Level 3 tiled Atmosphere (Aerosol/Cloud/Water Vapor/Ozone) product	MOD08
PGE 70	PGE70 runs the Level 3 8-Day Atmosphere processing	MOD08
PGE 72	PGE72 produces the Level 3 16-day 250m and 500m Vegetation Intermediate Composites .	
PGE 73	PGE73 runs the Level 3 Oceans monthly processing.	
PGE 74	PGE74 runs the Level 3 Oceans yearly processing.	
PGE 79	PGE79 produces the subsetted L1B calibrated radiances used in validation of the Ocean Color and Sea Surface Temperature products.	
PGE 80	PGE80 generates the Level 3 Land Intermediate Filtered Surface Reflectance products.	
PGE 82	PGE82 generates the CMG 16-day Nadir BRDF-Adjusted Reflectance product.	

Стандартные продукты MODIS

Для каждого стандартного продукта (см. далее пример для атмосферных продуктов) были созданы рецензируемый теоретический базовый документ алгоритма (ATBD) и руководство пользователя, а также были проведены многочисленные мероприятия по обеспечению качества (QA), валидации и оцениванию точности получаемых продуктов MODIS.

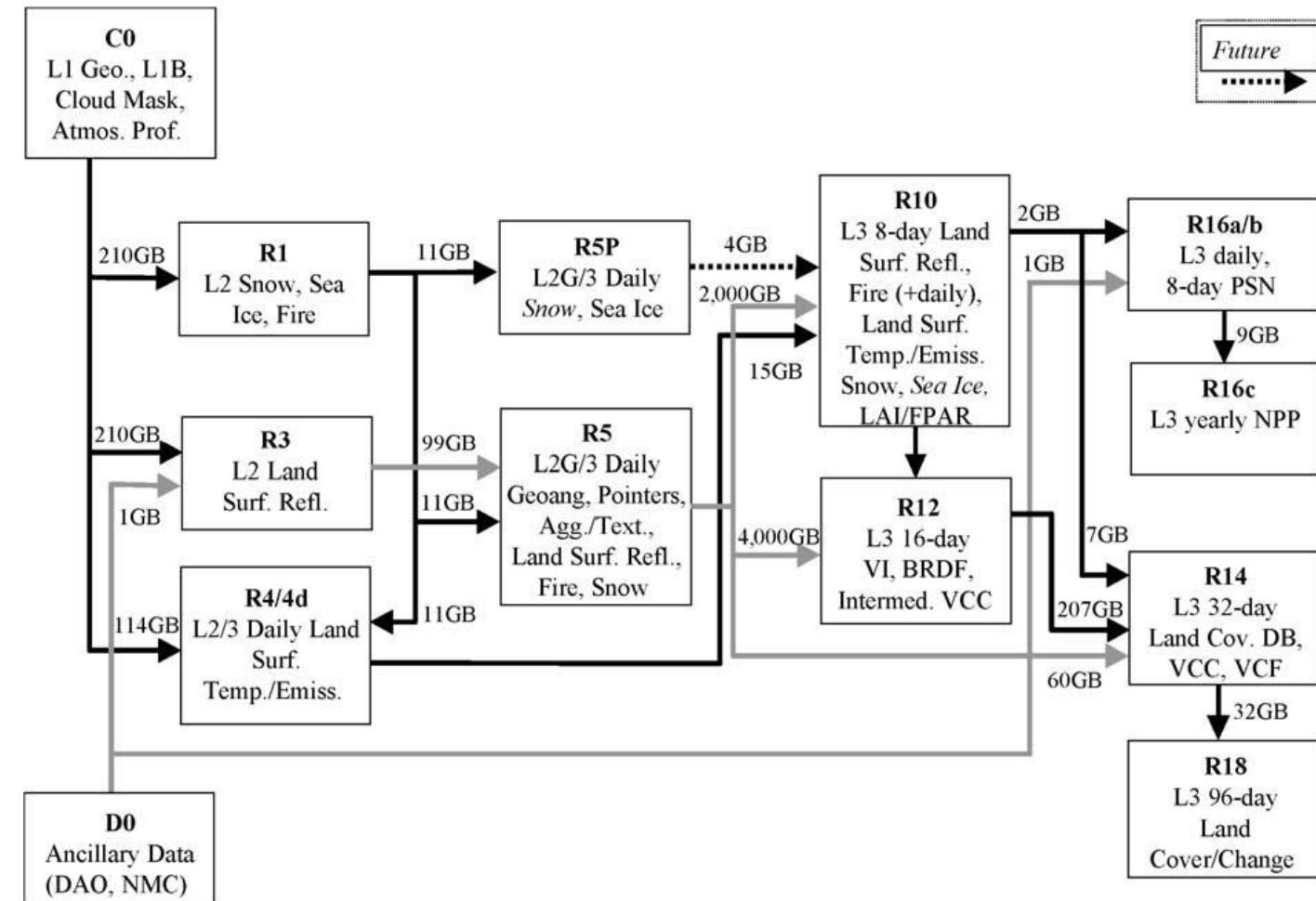
Структура обработки (на примере параметров атмосферы)



Особенности обработки данных сенсоров видимого и ближнего ИК диапазонов – поверхность Земли

MODland production sequence showing the data flow between algorithms

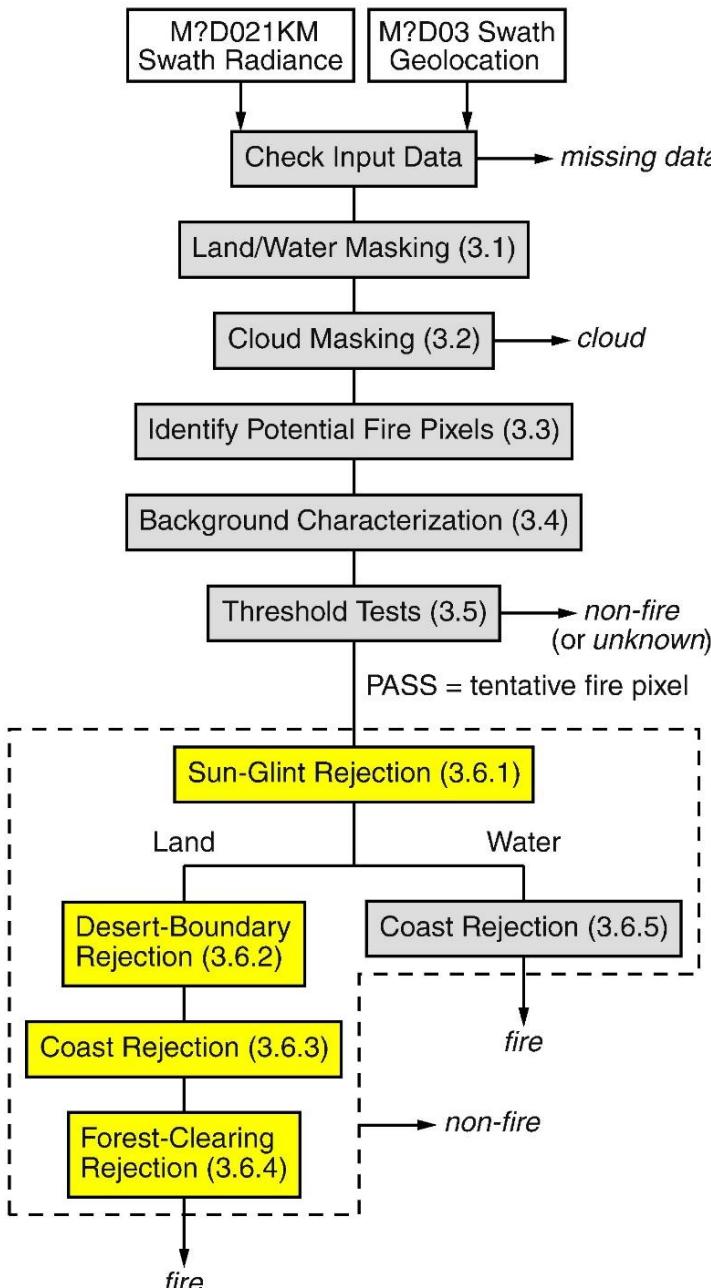
**C.O. Justice et al. /
Remote Sensing of
Environment 83 (2002)
3–15**



Каналы MODIS, используемые для обнаружения огня

Channel	Central wavelength (μm)	Purpose
1	0.65	Sun glint and coastal false alarm rejection; cloud masking.
2	0.86	Bright surface, sun glint, and coastal false alarm rejection; cloud masking.
7	2.1	Sun glint and coastal false alarm rejection.
21	3.96	High-range channel for fire detection and characterization.
22	3.96	Low-range channel for fire detection and characterization.
31	11.0	Fire detection, cloud masking.
32	12.0	Cloud masking.

Алгоритм MODIS по детектированию пожаров



Многолетние однородные ряды продуктов MODIS

Исходные данные MODIS и результаты их обработки доступны с 2000 г по настоящее время.

Этим обусловлена возможность создания однородных рядов продуктов MODIS, т.н. Collection/

Создание таких длительных однородных рядов данных и результатов их обработки беспрецедентно.

Этот результат является закономерным следствием как высокой культуры проведения экспериментальных измерений, обеспеченных высокоточной калибровкой, так и постоянной доработкой средств обработки данных, сопровождающей последующей переработкой всего массива исходных данных, который затрагивает модернизация ПО.

Данное качество несомненно явилось фактором, позволившим на новом уровне точности и надежности применять данные MODIS для обнаружения и детального исследованию долговременных (продолжительностью выше 25 лет) трендов глобальной климатической изменчивости земных объектов. Также следует отметить, что такой подход позволяет наряду с трендами устанавливать и параметры, описывающими величины естественных природных вариаций этих земных объектов.

Краткое содержание коллекции 6.1 (061)

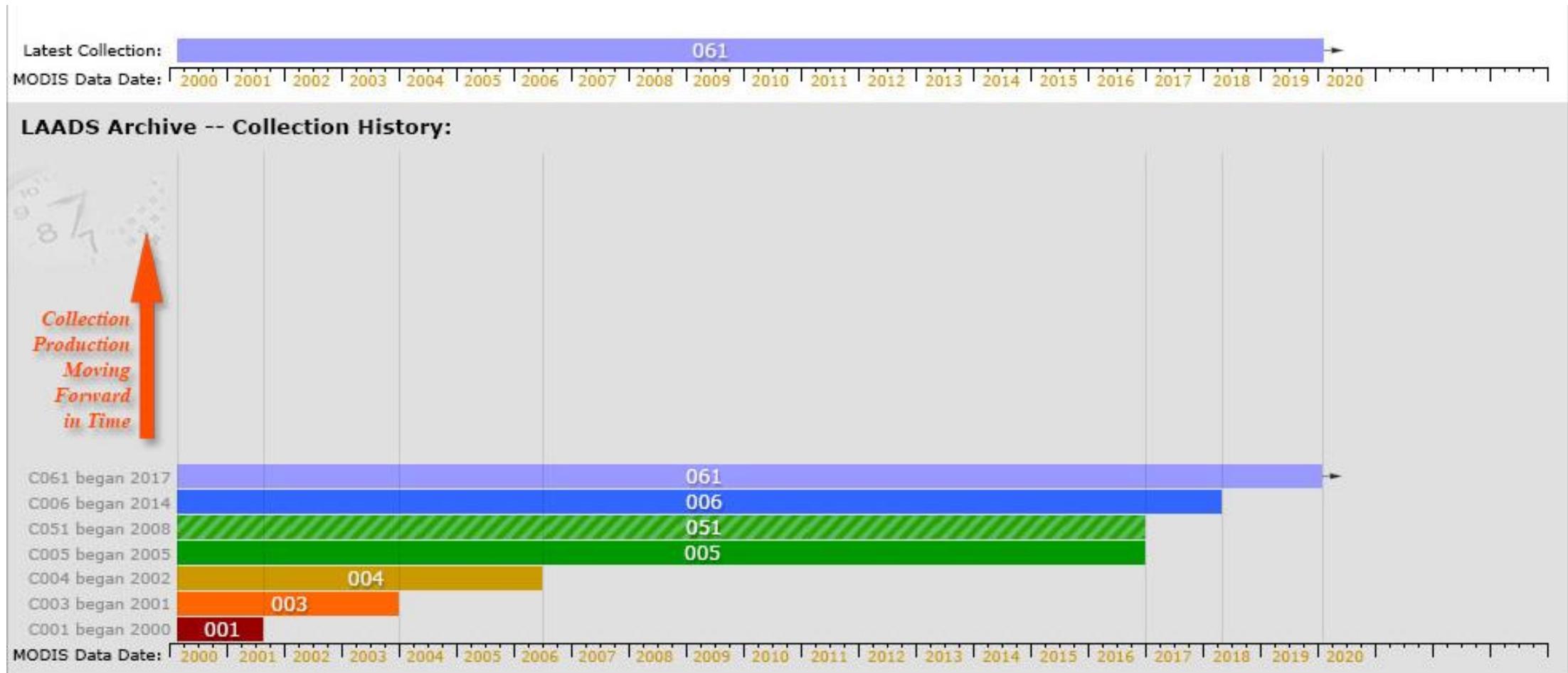
Система адаптивной обработки MODIS (MODAPS) в настоящее время создает улучшенную коллекцию 6.1 (061) для всех продуктов MODIS уровня 1 (L1) и более высоких уровней – 2 (L2) и 3 (L3) – для команды по атмосферным данным. Переход к созданию новой улучшенной коллекции 6.1 (061) был обусловлен необходимостью решения ряда проблем в текущей коллекции 6 (006) уровня 1B (L1B). Эти проблемы L1B в различной степени негативно повлияли на последующие продукты MODIS уровня 2 (L2) и 3 (L3), которые более подробно описаны ниже.

Команда MODIS по атмосферным данным решила использовать эту возможность повторной обработки для внедрения некоторых научных улучшений в свои продукты уровня 2 и уровня 3. Повторная обработка до уровня Collection 6.1 началась 28 сентября 2017 г. (публикация данных началась 15 октября 2017 г.) и была завершена 7 марта 2018 г.

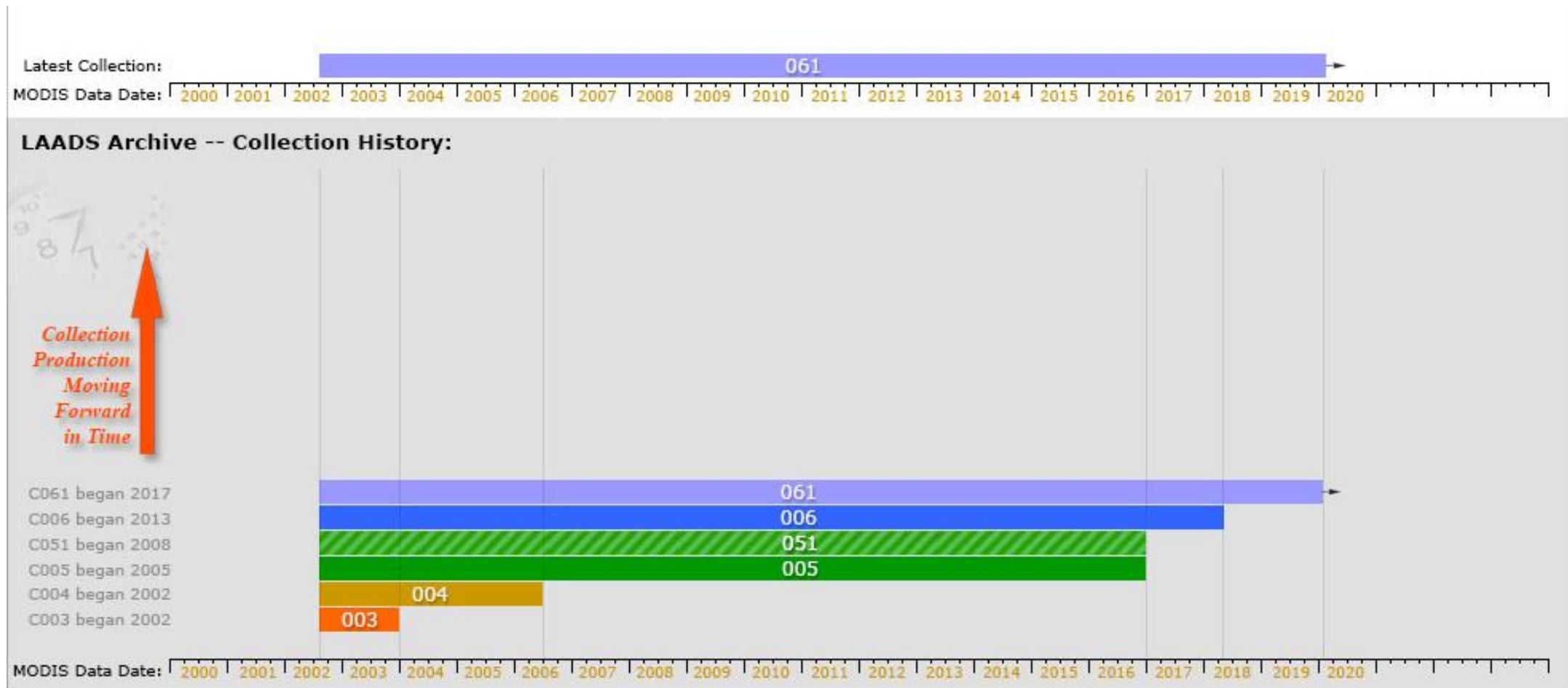
Следует отметить, что параллельная обработка данных Collection 6.0 в прямом потоке завершилась на 120-й день (2018 г.) для Terra и Aqua (30 апреля 2018 г.) — с этого момента в прямом потоке будет производиться только Collection 6.1.

<https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/documentation/collection-61>

История коллекций TERRA MODIS



История коллекций AQUA MODIS



Сопоставление данных VIIRS и MODIS. Продукты суши

MODIS and VIIRS products discussed in this continuity study.

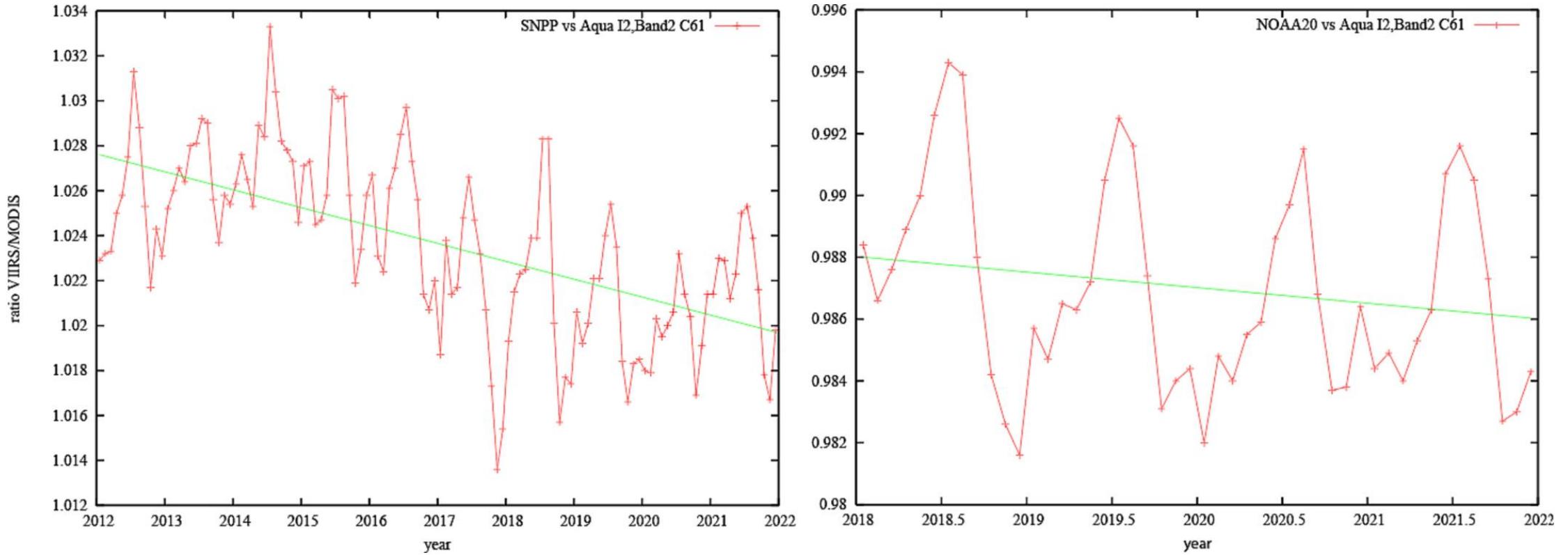
Product Description	MODIS Products ¹	VIIRS Products ² ,
Surface Reflectance	MOD09	VNP09
Leaf Area Index (LAI) and the Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)	MCD15	Vxx15
Downward Shortwave Radiation (DSR) and Photosynthetically Active Radiation (PAR)	MCD18	Vxx18
Evapotranspiration (ET)	MxD16	Vxx16
Global Land Surface Phenology (LSP)	MCD12	VNP22
Gross Primary Production (GPP) and Net Primary Production (NPP)	MxD17	Vxx17
Land Surface Temperature and Emissivity (LST&E)	MxD11, MxD21	Vxx21
Surface Products derived using Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC)	MCD19	VCD19
Global Water Reservoir (GWR)	MxD28	Vxx28
Normalized Difference Snow Index (NDSI) and Cloud-gap Filled Snow-Cover Extent (SCE)	MOD10	VNP10
Burned Area	MCD64	Vxx64
Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF), Nadir BRDF-Adjusted Reflectance (NBAR), and Albedo	MCD43	Vxx43

1) A prefix of “MOD” indicates a product from Terra MODIS, and “MCD” indicates a product from the combination of Terra and Aqua MODIS.

2) Lower-case x is used as a wildcard in product names to indicate that the product name is a reference to multiple child products.

3) A prefix of “VNP” indicates a product from SNPP VIIRS; “VJ1” indicates a product from JPSS-1 VIIRS; and “VCD” indicates a product from the combination of SNPP and JPSS-1 VIIRS.

Интеркалибровка данных MODIS в VIIRS



[Miguel O. Román et al.](#) Continuity between NASA MODIS Collection 6.1 and VIIRS Collection 2 land products
[Remote Sensing of Environment](#), Volume 302, 1 March 2024, 113963