

# ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

М. Сторм, Г. Стивенсон, Ф. Ховис,  
У. Гаверт, С. Дан, А. Дараб, Т. Чуан, П. Бернс

## ЛИДАРНЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ НАСА ПО КОНТРОЛЮ ПЕРЕНОСА ОБЛАКОВ И АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ, РАЗМЕЩЕННОЙ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

**Аннотация.** Работа посвящена методологическим подходам и оценке возможности практического использования технологии получения и обработки информации о местоположении, составе и распределении аэрозольных облаков, водных взвесей и других частиц в атмосфере Земли с использованием активных оптических систем (лазеров и фотонных счетчиков). Целью работы является анализ перспектив быстрого создания с использованием услуг стороннего подрядчика нового поколения высокотехнологических средств измерительного оборудования, включая космическую и наземную компоненты на примере лидарной технологии системы НАСА по контролю переноса облаков и атмосферных аэрозолей (Cloud Aerosol Transport System - CATS), установленной в комплексе японского экспериментального обитаемого (внешнего) модуля (Japanese Experimental Module - Exposed Facility - JEM-EF) Международной космической станции (International Space Station - ISS). Для решения поставленной задачи применялись системный и структурно-функциональный подходы. Использовались общезначимые и инженерные методы, в частности, методы астрометрии, спектрофотометрии, оптоэлектроники, лазерной техники и инженерного дизайна. В течение февраля 2016 года компоненты технологии и сам комплекс космических измерений в составе двух 25 Вт многоволновых твердотельных импульсных лазеров и тридцати двух лавинных многоканальных фотодетекторов успешно проработали в открытом космическом пространстве в течение более 300 часов и обеспечили сбор и накопление практической информации о характеристиках аэрозолей и некоторых газов в атмосфере Земли. Продемонстрирована практическая возможность привлечения малого коллектива разработчиков частной компании Fibertek, Inc. для быстрого и оптимального по затратам создания нового поколения космических лидаров, включая такие высокотехнологические операции, как проектирование и дизайн, создание работоспособного изделия, его тестирование и размещение в космическом пространстве.

**Ключевые слова:** НАСА, Международная космическая станция, Перенос облачных аэрозолей, Загрязнение, Атмосфера Земли, Лазерная система обнаружения, Лидар, Твердотельный лазер, Лавинный фотодетектор, Оптическая инженерия.

**Abstract.** The paper studies the methodological approaches and evaluates the possibility to use the technology of acquiring and processing information about the location, composition and distribution of aerosol clouds, water suspensions and other particles in Earth's atmosphere using active optical instruments (lasers and photon counters). The research purpose is the analysis of the prospects of creation of the new generation of high technology measurement instruments using the external company services, including the space and land-based components, analogous to NASA's lidar Cloud Aerosol Transport System, basing in the Exposed Facility of the Japanese Experimental Module of the International Space Station. To solve the research task, the authors apply the system and structural-functional approaches. The authors use the general methods of physics and engineering methods, particularly, the methods of astrometry, spectrophotometry, optoelectronics, laser technology and engineering design. The technology components and the space measurement complex, including two 25W multiwave solid-state impulse lasers and 32 avalanche multichannel photodetectors, had successfully worked for more than 300 hours in outer space during February 2016 and helped collect practical information about the characteristics of aerosols and some

*gases in Earth's atmosphere. The authors demonstrate practical possibility to involve a small group of engineers of the private Fibertek, Inc. company for the fast and cost-competitive creation of the new generation of space lidars, including such high-technology operations as construction and design, creation of an operational product, its testing and deployment in space.*

**Keywords:** Lidar, Laser detection system, Atmosphere of Earth, Pollution, Cloud Aerosol Transport, International Space Station, NASA, Solid-state laser, Avalanche photodetector, Optical Engineering.

### Введение

**А**мериканское космическое агентство НАСА активно взаимодействует с частными высокотехнологическими компаниями для ускорения и удешевления разработки различных технологических решений. Выбор конкретных технологий и партнеров осуществляется НАСА в рамках программы оценки элементов критических технологий (Critical Technology Elements) по их степени готовности к практическому использованию (Technology Readiness Levels), начиная от предварительных научных исследований и эскизных разработок и заканчивая использованием в штатном режиме космического полета. В свою очередь, перечни критических технологий формируются и обновляются в рамках стратегий технологического развития, которые конкретизируются в технологических дорожных картах НАСА. С одной стороны, технологические дорожные карты содержат всю необходимую информацию о приоритетах и перечнях технологий, с другой стороны, эти документы выступают основополагающим элементом государственной Программы капиталовложений в стратегические космические технологии (Strategic Space Technology Investment Plan). Таким образом, НАСА обладает необходимыми компетенциями и инструментами для формирования перспективного плана закупок отдельных технологических решений на открытом рынке. Поскольку покупаемые технологии по большей части допускают широкое использование в гражданском секторе экономики, контракты НАСА являются, с одной стороны, мерой государственной поддержки деятельности частных высокотехнологических компаний, а с другой стороны, расширяют технологическую базу самого Агентства, повышают общую надежность технологического обеспечения его функционирования.

В работе анализируются особенности технологического решения, предложенного частным контрактором - компанией Fibertek, Inc. для построения системы активного высокоточного лазерного зондирования атмосферы Земли. Это решение предназначено для применения в системе глобального контроля переноса облаков и атмосферных аэрозолей CATS (Cloud Aerosol Transport System), которую НАСА разместило в составе японского экспериментального модуля JEM-EF (Japanese Experimental Module - Exposed Facility - JEM-EF) Международной космической станции (ISS).

Программа совместного создания нового поколения лидаров была полностью реализована НАСА и Fibertek, Inc. в течение 24 месяцев и стоила 14 млн. долларов США, включая затраты на размещение в модуле ISS. Время работы комплекса в открытом космосе (свыше 300 часов) превышает годовой лимит полетов стандартного самолета дистанционного зондирования атмосферы.

### Методология

В отличие от большинства существующих космических систем дистанционного зондирования стоимостью в сотни миллионов долларов и требующих участия оператора, проект лидара для CATS был реализован в стиле недорогого «беспилотного» решения, не требующего обслуживания на борту ISS. Использование стандартных технологических схем конструирования и производства НАСА, предоставленных, в частности, Центром космических полетов имени Годдарда (GSFC), позволило небольшой команде разработчиков компании Fibertek, Inc. ускорить проектирование нового решения и снизить его общую стоимость. Так, например, лазеры изначально были построены в соответствии со стандартами компании по использованию оптических компонент на борту воздушного

судна, а система активного зондирования (оптические датчики и электронные компоненты) были изготовлены с использованием недорогих радиационно-устойчивых элементов. Для минимизации числа электрических компонент и переключений основная часть электронного функционала была реализована с использованием программируемых вентильных матриц (field programmable gate arrays) производства корпорации Actel. Несмотря на то, что многие электрические, электромеханические и электронные компоненты не были сертифицированы для аэрокосмического применения, использование свыше 95% предназначенных для космических полетов коаксиальных соединителей, кабельных сборок и переключателей позволило значительно повысить надежность оборудования в целом. По оценкам разработчиков решения, степень надежности комплекса технических средств возросла с класса D до класса В/С.

## Результаты

Реализованная программа свидетельствует о том, что Международная космическая станция готова к использованию нового поколения космических лидаров, что имеет важное значение для мониторинга погоды и контроля глобальных изменений в атмосфере Земли, включая распределение аэрозолей, метана, углекислого газа, водяного пара и озона (рис. 1). В настоящее время в стадии разработки находится аналогичное решение для дистанционного лазерного измерения распределения ветровых потоков, что особенно актуально для проектирования офшорных ветровых ферм.

Эксперименты, проведенные на борту Международной космической станции, позволили также оценить эффективность работы комплекса в полете. Описание основных инструментальных компонент и изображения систем в процессе тестирования и сборки приведены на рис. 2. Система измерения характеристик переноса аэрозолей CATS включает в себя телескоп, оптический приемник, шлейфы фотодетекторов, крышку телескопа, калиматорные призмы, приводы защитных крышек, приемник лидара с высоким спектральным разрешением, контроллер лидара и сами лазеры.

Компания Fibertek, Inc. непосредственно разработала следующие подсистемы CATS: полетный контроллер лидара; два современных многоволновых твердотельных лазера с диодной накачкой средней мощностью 25 Вт с одновременными импульсами на длине волны 1064, 532 и 355 нм; мощный конвертор напряжения для шины питания (от 120В до 28В); два отказоустойчивых блокировочных устройства и имитатор условий Международной космической станции (рис. 3).

Кроме того, были разработаны и/или протестированы на совместимость системы коммуникаций с оборудованием Международной космической станции на основе сети Ethernet и волоконно-оптических распределенных интерфейсов передачи данных (fiber distributed data interfaces), интерфейс контроллера лидара, многофункциональная система контроля и передачи данных с использованием набора программных приложений и библиотек Telescience Resource Kit (TReK) для связи с наземным Центром космических полетов имени Джорджа Маршалла (MSFC).

В свою очередь Центром космических полетов имени Годдарда (GSFC) был спроектирован построен и собран в целом комплект полезной нагрузки для японского экспериментального модуля

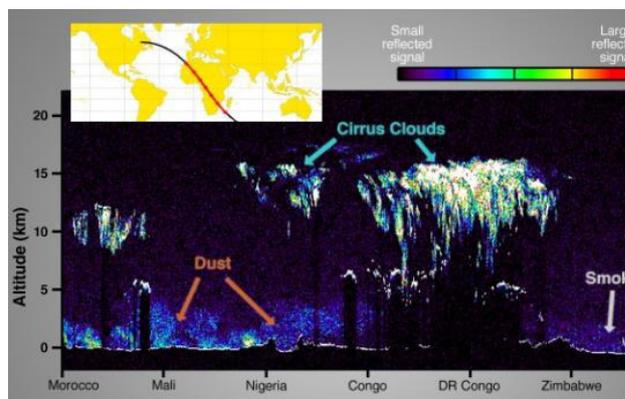


Рис. 1. Актуальные полетные данные лидара CATS, демонстрирующие распределение аэрозолей, песка из пустыни Сахара, облаков и дыма лесных пожаров над территорией Африки [2].

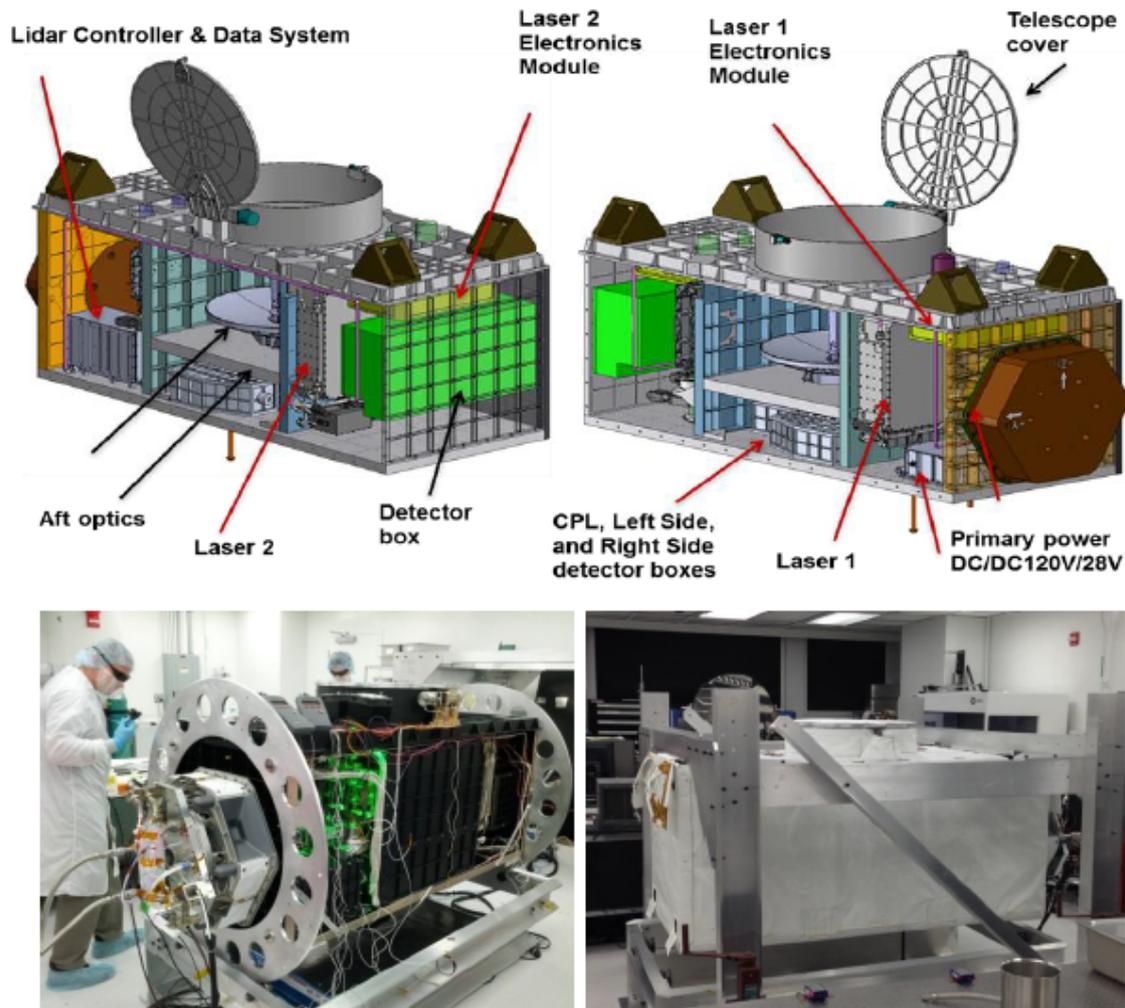


Рис. 2. Комплекс CATS в процессе сборки (слева) и полностью собранный модуль с тепловой защитой (справа)

Международной космической станции. В частности, были изготовлены в виде конечных продуктов телескоп, калиматорные призмы и приводы защитных крышек, а также оптический приемник и детекторы сигналов.

### Панель управления

Управление оборудованием лидара обеспечивалось оператором комплекса CATS через сеть Интернет и внутренние линии Международной космической станции. Таким образом, формирование команд управления и осуществление функций контроля осуществлялось не в космосе, а с наземного пункта управления. В свою очередь, команды управления были скомпонованы в десять различных операционных сценариев. С их помощью, в частности, обеспечивалось управление работой лазеров (текущий статус, энергия излучения на всех длинах волн, длина импульса) и переход в режимы сбора данных. Разработанные сценарии также позволяли контролировать работоспособность и безопасность всех устройств комплекса, включение механизмов наведения, управление электропитанием, подстройку приемника сигналов и осуществление других функций управления.

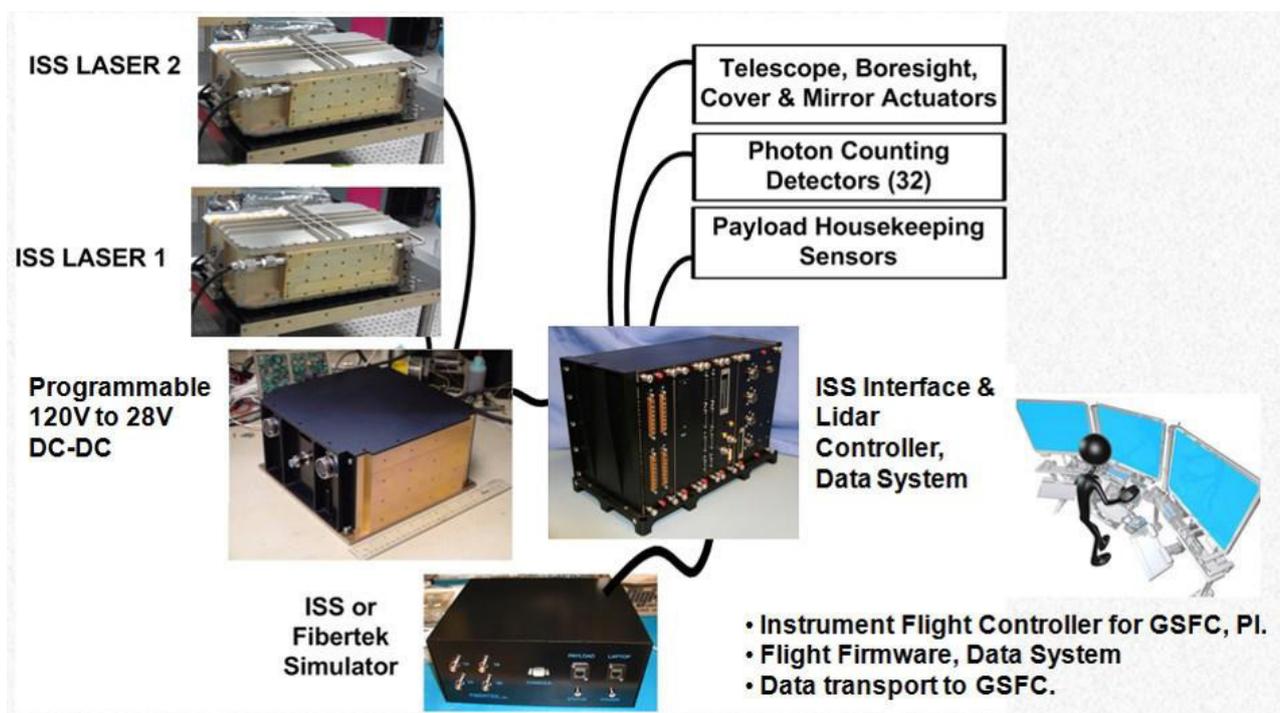


Рис. 3. Компоненты лидара CATS, разработанные компанией Fibertek, Inc.

### Панель сбора данных

Панель сбора и обработки данных поддерживает 24-канальные лавинные фотодетекторы. Полученные ими сигналы снабжаются временным кодом, буферизуются, пакетируются и передаются во внутренние каналы связи Международной космической станции для последующей передачи в наземный пункт управления.

### Безопасность

Центр космических полетов имени Годдарда и компания Fibertek, Inc. Дополнительно взаимодействовали с Космическим центром имени Линдона Джонсона (JSC), чтобы предусмотреть все необходимые наборы команд и функций управления с точки зрения обеспечения безопасности пилотируемого космического полета. В частности, все компоненты размещенной на Международной космической станции полезной нагрузки могли быть выключены вручную, или с помощью автоматических блокираторов. Была также предусмотрена система автоматического выключения оборудования в случае неисправности или перегрузки. Данные о работоспособности комплекса в целом и текущем статусе всех его компонент непрерывно контролировались на панели управления наземной станции.

### Лазеры системы CATS

#### Международной космической станции

Использованные в составе лидара новые лазеры мощностью 25 Вт превышают по эффективности аналогичное оборудование систем американско-французского спутника для изучения облачного покрова Земли CALIPSO, а также спутников НАСА по программе наблюдения Земли ICESat-1 и ICESat-2, в терминах мощности излучения, качества пучка и ширине спектральной линии. Суммарная импульсная

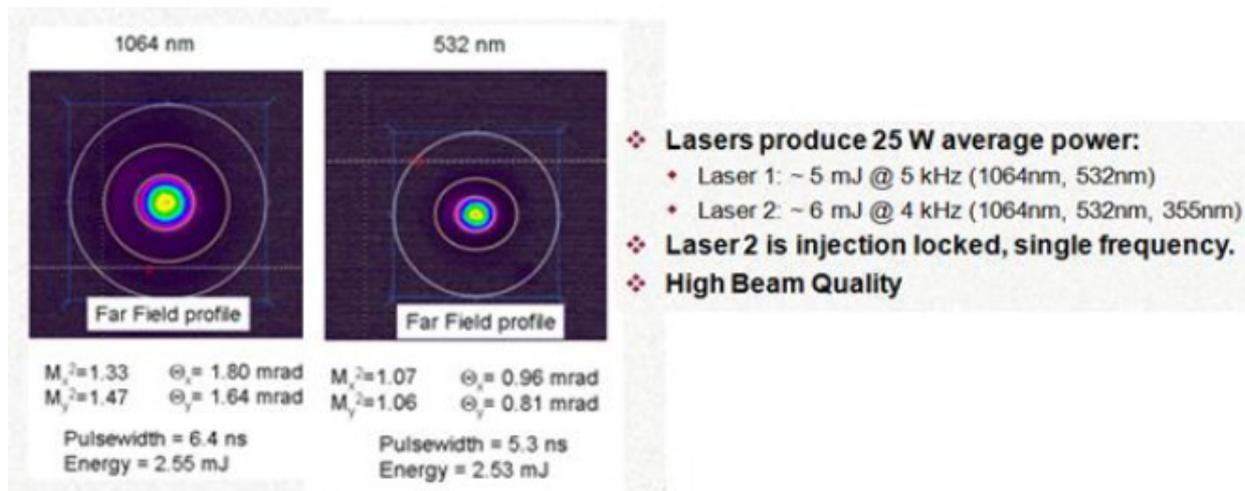


Рис. 4. CATS лазер 2, контроллер лидара, процесс сборки лазера (слева направо)

мощность лазера 1 составляет 5 мДж, которая примерно поровну излучается на длине волны 1064 нм и 532 нм. В свою очередь, лазер 2 (рис. 4) снабжен дополнительным нелинейным кристаллом для утробления частоты, что позволяет при мощности импульса 6 мДж излучать во всем оптическом спектре от инфракрасного до ультрафиолетового диапазона на длинах волн, соответственно, 1064, 532 и 355 нм. Нелинейный кристалл размещен вне основного лазера, что позволяет, при необходимости, исключить ультрафиолетовую гармонику. И использованные лазеры характеризуются также высоким оптическим качеством излучения, как с точки зрения монохроматичности, так и с точки зрения фокусировки и расходимости луча, в частности, обеспечивается качество пучка  $<1,5 M^2$  на всех длинах волн.

### Заклучение

Разработка, развертывание на орбите и положительный опыт практического функционирования нового лидара для системы CATS свидетельствует об успехе проекта по привлечению частной компании для быстрой и недорогой реализации технического решения, способного функционировать сотни и тысячи часов в космосе, что делает его пригодным для использования в миссиях наблюдения продолжительностью от 3 до 5 лет эксплуатации.

Еще одним важным результатом программы создания лидара стало практическое подтверждение готовности технологических компаний за пределами периметра организаций НАСА быстро предлагать эффективные решения по приемлемым ценам. В свою очередь, это свидетельствует как о высоком качестве методов стратегического планирования НАСА, так и об уровне индустриальной институциональной среды в целом.

## Благодарности

Эта работа была поддержана научным руководителем CATS доктором Мэтью МакГиллом (НАСА, Центр космических полетов Годдарда) и Марибен Идин (НАСА, Национальная лаборатория Международной космической станции).

*Статья впервые опубликована:  
The European Physical Journal Conferences 119:04002 · January 2016.  
DOI: 10.1051/epjconf/201611904002  
Комментированный перевод: А.А. Яник*

## Библиография

1. Moring F. Station Role In Earth Science Growing // Aviation Week. 2014. 24 Jan. URL: <http://aviation-week.com/space/station-role-earth-science-growing> (20.12.2016).
2. Ramsayer K. Africa, From a CATS Point of View // NASA. 2015. 26 Feb. URL: <https://www.nasa.gov/content/goddard/africa-from-a-cats-point-of-view> (20.12.2016)
3. McGill M. The Cloud-Aerosol Transport System (CATS): A New Earth Science Capability for ISS // Proceedings from the 1st Annual ISS Research and Development Conference, June 26-27, 2012.
4. Mark Storm, et al., Lidar Technology Avionics and Laser Flight Hardware for the Cloud-Aerosol Transport System (CATS) Payload on the International Space Station (JEM-EF) // Proceedings from the 1st Annual ISS Research and Development Conference, June 26-27, 2012.
5. Ti Chuang, et al., Space-Based, Multi-Wavelength Solid-State Lasers for NASA's Cloud Aerosol Transport System for the International Space Station (CATS-ISS) // SPIE Proceedings Vol. 8599. Solid State Lasers XXII: Technology and Devices, 85990N (March 6, 2013); DOI: 10.1117/12.2005545.

## References (transliterated)

1. Moring F. Station Role In Earth Science Growing // Aviation Week. 2014. 24 Jan. URL: <http://aviation-week.com/space/station-role-earth-science-growing> (20.12.2016).
2. Ramsayer K. Africa, From a CATS Point of View // NASA. 2015. 26 Feb. URL: <https://www.nasa.gov/content/goddard/africa-from-a-cats-point-of-view> (20.12.2016)
3. McGill M. The Cloud-Aerosol Transport System (CATS): A New Earth Science Capability for ISS // Proceedings from the 1st Annual ISS Research and Development Conference, June 26-27, 2012.
4. Mark Storm, et al., Lidar Technology Avionics and Laser Flight Hardware for the Cloud-Aerosol Transport System (CATS) Payload on the International Space Station (JEM-EF) // Proceedings from the 1st Annual ISS Research and Development Conference, June 26-27, 2012.
5. Ti Chuang, et al., Space-Based, Multi-Wavelength Solid-State Lasers for NASA's Cloud Aerosol Transport System for the International Space Station (CATS-ISS) // SPIE Proceedings Vol. 8599. Solid State Lasers XXII: Technology and Devices, 85990N (March 6, 2013); DOI: 10.1117/12.2005545.