

История создания и работы в составе орбитальной станции «Мир» первого российского космического лидара БАЛКАН

Ю.С. Балин¹, А.А. Тихомиров^{2*}

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

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр-т Академический, 10/3

Поступила в редакцию 31.08.2011 г.

Онисаны история разработки, наземных и летных испытаний первого отечественного космического лидара БАЛКАН, а также некоторые полученные результаты при проведении космических экспериментов по зондированию облаков и подстилающей поверхности с борта орбитальной станции «Мир». Представлены сравнительные характеристики первых космических лидаров LITE, БАЛКАН, ALISSA.

Ключевые слова: космический лидар БАЛКАН, орбитальная станция «Мир», атмосфера, подстилающая поверхность, результаты экспериментов; space lidar BALKAN, space station MIR, atmosphere, underlying surface, experimental results.

Введение

Наблюдение за состоянием атмосферы и подстилающей поверхности (ПП) Земли из космоса с помощью приборов, установленных на космических аппаратах (КА), позволяет оперативно в региональном и глобальном масштабах проводить исследования этих объектов с целью формирования прогнозов погоды и решения других задач [1–3]. На первоначальном этапе развития космической техники основными видами информации об атмосфере и ПП Земли, получаемой с борта КА, являлись фотометрические и радиометрические изображения, поскольку первоначально развитие техники космического дистанционного зондирования было сфокусировано на пассивных системах видимого, инфракрасного и СВЧ-диапазонов [3, 4].

Активное дистанционное зондирование с помощью лидаров обеспечивает более высокое пространственное разрешение, недоступное пассивным и активным радиолокационным системам, и позволяет оперативно получать более полные и детальные сведения о различных характеристиках атмосферы [5]. Впервые проект многоволновой космической лидарной станции, разрабатываемой NASA в рамках программы Shuttle Atmospheric Lidar System, был представлен серией докладов на 9-й ILRC [6] в 1979 г.

Первый лидар, созданный NASA для проведения экспериментов по программе LITE (Lidar In-Space Technology Experiment) [7], работал на Space

shuttle Discovery в сентябре 1994 г. Российский лидар БАЛКАН [8] был выведен в космос на модуле «Спектр» орбитальной станции (ОС) «Мир» в мае 1995 г. Затем на модуле «Природа» в 1996 г. дополнительно на ОС «Мир» был доставлен российско-французский лидар ALISSA [9].

В создании первого отечественного лидара БАЛКАН, предназначенного для установки на пилотируемый космический корабль (ПКК), приняли участие как предприятия Министерства общего машиностроения СССР (НПО «Энергия» и НПО «Радиоприбор»), так и учреждения Сибирского отделения Академии наук СССР: Институт оптики атмосферы и СКБ научного приборостроения «Оптика» (ныне Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН). В настоящей статье представлена история создания лидара БАЛКАН, включающая этапы разработки, изготовления, наземных и летных испытаний, а также некоторые результаты проведенных экспериментов с борта ОС «Мир».

Первые проекты по космическому лидару

К середине 70-х гг. прошлого века в Институте оптики атмосферы (ИОА) и работавшем под его научным руководством СКБ научного приборостроения «Оптика» СО АН СССР был накоплен определенный опыт в создании мобильных наземных и самолетных лидаров, характеристики которых приведены в [10–13]. Так, в 1974 г. в СКБ совместно с ИОА был создан и поставлен заказчику опыт-

* Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru).

ный образец лидарного комплекса X-94 [10, 13] для сопровождения полигонных испытаний специальных оптико-электронных средств. В СКБ была разработана конструкторская документация на лидар «ЛОЗА-2», по которой на предприятиях г. Кемерово в 1975 г. была изготовлена малая серия (5 комплектов) устройств. После настройки и некоторых доработок лидары были поставлены в ряд организаций СССР, а также в Институт электроники Болгарской академии наук [12]. В 1974 г. в объединении был также изготовлен экспериментальный образец самолетного поляризационного лидара «Светозар-2» [11].

Накопленный в объединении опыт по проектированию и изготовлению мобильных лидарных систем позволил директору ИОА В.Е. Зуеву инициировать в конце 1974 г. приглашение в Томск представителей НПО «Энергия» (ныне Российская космическая корпорация – РКК «Энергия»), занимавшихся постановкой научных экспериментов на ПКК. Цель приглашения заключалась в показе созданных в ИОА и СКБ оптико-электронных приборов и устройств и обсуждении возможности создания лидара, предназначенного для установки на борту ПКК.

В 1975 г. в ИОА совместно с СКБ был разработан аванпроект «Система лазерного зондирования с борта космического аппарата» по возможным вариантам создания приемопередающего устройства лидара и системы регистрации лидарных сигналов. Однако уровень развития отечественной техники в области надежных маломощных лазеров и быстродействующих аналого-цифровых преобразователей в СССР был в то время невысоким, поэтому проведенная работа завершилась только написанием пояснительной записки технического предложения, которая была передана в НПО «Энергия».

В начале 1976 г. заведующий лабораторией ИОА И.В. Самохвалов и представители СКБ А.А. Тихомиров и В.В. Москвитин участвовали в совещании, проводимом в Главном управлении Гидрометеослужбы (ГУГМС) СМ СССР. Цель совещания заключалась в оценке возможности создания лидара на основе космического геодезического дальномера с рубиновым лазером, который был разработан в НПО «Радиоприбор» (г. Москва). Руководителями ГУГМС было предложено объединиться ИОА, СКБ НП «Оптика», ЦАО ГУГМС, НПО «Радиоприбор», НПО «Энергия» для разработки космического лидара, устанавливаемого на одну из пилотируемых станций типа «Салют», длительность полета которых продолжалась от нескольких недель до нескольких лет. Однако Институт оптики атмосферы отказался от участия в совместной кооперации с ЦАО, хотя у разработчиков Центральной аэрологической обсерватории имелся опыт создания самолетных лидаров и самолета-лаборатории, на котором работали такие лидары [14].

В 1979 г. на 9-й ILRC в Мюнхене В.Е. Зуев, Ю.С. Балин и А.А. Тихомиров ознакомились с проектами NASA и DFVLR (ФРГ) по созданию космических лидаров, предполагаемых к запуску в 80-х гг.

на Space Shuttle. Сотрудниками названных фирм был представлен ряд докладов на эту тему [6].

К середине 80-х гг. в ИОА и СКБ НП «Оптика» были разработаны различные модификации мобильных лидаров и других оптико-электронных устройств [12, 13]. Дальнейшее взаимодействие с НПО «Энергия» продолжилось осенью 1984 г. К этому времени вышло решение директивных органов СССР «О создании аппаратуры для проведения экспериментов и исследований на транспортных модульных кораблях». Представители ИОА И.В. Самохвалов, Г.М. Креков, В.С. Шаманаев и СКБ – А.А. Тихомиров участвовали в совещании в отделении НПО «Энергия», занимавшемся постановкой научных космических экспериментов. На этом совещании обсуждались возможности создания космического лидара на основе нового лазерного дальномера (разработка НПО «Радиоприбор»). Предполагалась установка лидара на создаваемую новую орбитальную станцию «Мир» либо на разрабатываемый советский челнок «Буран». В результате обсуждений были определены задачи космического лазерного зондирования, которые должны были решаться с помощью нового лидара. Среди них:

- экспериментальное определение потенциальных возможностей зондирования плотных аэрозольных образований из космоса и реальных рабочих характеристик лидара;
- отработка технологии лазерного зондирования из космоса;
- измерение высоты верхней границы и оптико-физических параметров облачных образований;
- определение возможности селекции различных видов облачности на фоне подстилающей поверхности;
- оценка альбедо подстилающей поверхности;
- зондирование верхнего слоя океана;
- уточнение параметров орбиты КА методом лазерного зондирования.

В начале 1985 г. вышло межведомственное решение (МОМ СССР и АН СССР) «Проведение лазерного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности с КА». Между ИОА и НПО «Энергия» был заключен достаточно объемный по финансированию и продолжительности контракт «Разработка методов и создание аппаратуры дистанционного определения параметров облачных образований и подстилающей поверхности с борта КА». В качестве соисполнителя было подключено СКБ НП «Оптика». В результате достигнутых договоренностей в 1985 г. в СКБ были переданы конструкторская документация и опытный образец космического дальномера 17В91 для определения возможных путей его доработки и создания на его основе лидара, регистрирующего сигналы от облаков и аэрозольной атмосферы. Исходя из полученной документации и опытного образца дальномера, а также коротких сроков создания лидара (предполагалась поставка его в НПО «Энергия» в 1988 г.), были приняты следующие решения:

- а) провести минимальный объем доработок дальномера;

б) сделать управление лидаром полуавтоматическим (предполагалось участие операторов-космонавтов в проведении экспериментов);

в) принять во внимание, что число импульсов зондирования в сеансе измерений может изменяться от 20 до 60 (из-за ограничения воздушного охлаждения используемого лазера с ламповой накачкой);

г) разработать блок аналого-цифрового преобразования лидарного сигнала с временным дискретом 20 нс, что было наивысшим достижением в то время;

д) сконструировать пульт полуавтоматического управления лидаром;

е) осуществлять сброс получаемой оцифрованной информации о лидарных сигналах через бортовую цифровую вычислительную машину ОС по телеметрическому каналу для дальнейшей обработки сигналов по различным алгоритмам на Земле;

ж) создать контрольно-поверочную аппаратуру (КПА) для различных видов испытания и проверок лидара.

Для координации выполняемых работ с.н.с. ИОА Ю.С. Балин был направлен в СКБ НП «Оптика» на должность начальника вновь созданного отдела, предназначенного для разработки космического лидара. К этому времени вышел ряд публикаций сотрудников ИОА по возможностям лазерного зондирования из космоса [15, 16]. Была начата разработка технического задания на лидар, который получил название БАЛКАН (Бортовой Аэрозольный Лидар, Космический, Академия Наук).

Этап разработки и испытаний лидара

Все работы по созданию космического лидара проводились в соответствии с нормативным документом «Положение НА-76», в котором регламентирована вся процедура разработки, виды необходимых наземных и летных испытаний научной аппаратуры, устанавливаемой на борту как простых КА, так и ПКК. Ряд сотрудников СКБ были командированы в ИКИ АН СССР (г. Москва) и СКБ ИКИ (г. Фрунзе) для ознакомления с дополнительными нормативными документами, регламентирующими этапы проектирования, изготовления и испытаний научной космической аппаратуры.

Было принято решение сохранить систему регистрации эхосигналов лазерного дальномера, работающей по пороговому принципу (рис. 1, а), когда дальность до достижения определенного порогового уровня эхосигналом от облака или ПП определялась с помощью измерителя временных интервалов с достаточно высокой точностью (0,75 м), и дополнить эту систему аналого-цифровым преобразователем (АЦП) эхосигналов собственной разработки, регистрирующим сигналы с постоянным дискретом (рис. 1, б). Таким образом, повышалась надежность работы системы регистрации лидарных сигналов в целом. Разрабатываемый АЦП обеспечивал пространственное разрешение в эхосигнале, равное 3 м [17].



Рис. 1. Принципы регистрации эхосигналов от облаков и подстилающей поверхности: а – по пороговому принципу; б – с помощью блока АЦП. Точки на сигналах – местоположение измеренных амплитуд и временных интервалов

В 1987 г. НПО «Энергия» согласовало техническое задание (ТЗ) на лидар БАЛКАН, разработанное в СКБ. Еще на этапе согласования ТЗ велась разработка электрических макетов пульта управления (шифр ППУ-20) лидаром и блока АЦП лидарных сигналов (шифр УИЗ-27). Проводился цикл лабораторно-отрабочных испытаний созданных макетов с целью отработки их электрических и тепловых режимов и совместной работы с полученным из НПО «Радиоприбор» образцом дальномера. Для повышения надежности использовались «холодное» и «горячее» резервирование узлов и блоков лидара [17, 20].

В феврале 1987 г. на научно-техническом совете отделения НПО «Энергия», курирующего разработку научной аппаратуры ОС «Мир», защищен эскизный проект по лидару БАЛКАН на основании результатов, полученных путем лабораторно-отрабочных испытаний, принятых схемных решений вновь разрабатываемых отдельных блоков и всего лидара в целом. Были также представлены: расчеты ожидаемых величин лидарных сигналов при зондировании с орбиты атмосферы и различных наземных объектов; описание организации работ с применением лидара; методика и алгоритмы интерпретации лидарных измерений. По результатам защиты было принято решение – установить лидар на 3-й модуль ОС «Мир» («Спектр»). К этому времени ОС «Мир» уже функционировала в течение года на орбите в составе одного базового блока [18].

В 1988–1989 гг. в СКБ НП «Оптика» проводилась разработка рабочей конструкторской документации на создаваемые опытные образцы блоков лидара, их изготовление и проведение конструкторско-доводочных испытаний (КДИ) с целью проверки соответствия требованиям по механоклиматическим воздействиям, которым подвергается космическая техника на этапах вывода на орбиту и последующего полета. Был также разработан и изготовлен комплекс КПА, которая необходима для прове-

дения входного контроля каждого блока лидара на космическом предприятии, автономных испытаний лидара и его составных частей (проверка их функционирования по определенным программам) и комплексных испытаний лидара в составе орбитального модуля для контроля получаемой телеметрической информации от лидара при работе с имитаторами [19]. Одновременно были изготовлены габаритно-массовый и технологический макеты лидара для проведения предварительных стыковок с орбитальным модулем, а также тренажерный макет лидара для поставки в Центр подготовки космонавтов.

На этом этапе большой объем работ заняли согласование электрических схем с различными службами НПО «Энергия»: по электропитанию, управлению работой лидара, передаче телеметрической информации, синхронизации работы с системой единого времени, а также разработка и согласование циклограммы работы лидара в целом. По результатам проведенных КДИ была откорректирована конструкторская документация на лидар БАЛКАН и КПА, изготовлены и испытаны штатные образцы блоков лидара и КПА (по два комплекта), которые были поставлены на завод им. М.В. Хруничева (г. Москва), где проводилась сборка модуля «Спектр» (конец 1989 г.).

Необходимым этапом разработки аппаратуры, устанавливаемой на борту ПКК, являлось согласование перечней используемых материалов, сырья и комплектующих в Институте медико-биологических проблем (г. Москва) для установки лидара на ОС «Мир» (по требованиям пожаровзрывобезопасности, ядовитости и т.п.), что также заняло определенный период времени. Были разработаны комплект документов и инструкций по проверке лидара и его отдельных блоков на разных этапах испытаний, а также бортовая инструкция по работе с лидаром для космонавтов.

В 1990 г. были проведены монтаж блоков лидара в модуле «Спектр» и комплексные испытания в составе модуля, включающие отработку управления лидаром и передачи получаемой телеметрической информации с использованием имитатора оптических сигналов, входящего в комплект КПА [19]. По результатам проведенных испытаний лидар допустили к полету на ОС «Мир». Впервые о подготовленном к запуску в космос отечественном лидаре БАЛКАН было сообщено на 15-й ILRC, проходившей в 1990 г. в Томске [8]. На рис. 2 показан внешний вид основных блоков лидара. Подробное описание состава лидара БАЛКАН и его технические характеристики представлены в публикациях [17, 20–22].

Запуск модуля «Спектр» и пристыковка его к ОС «Мир» были запланированы на 1991 г. Однако в связи с произошедшими в СССР в 1991 г. событиями и дальнейшими преобразованиями государства запуск модуля был отменен. В начале 1992 г. блоки лидара были демонтированы из модуля и законсервированы.

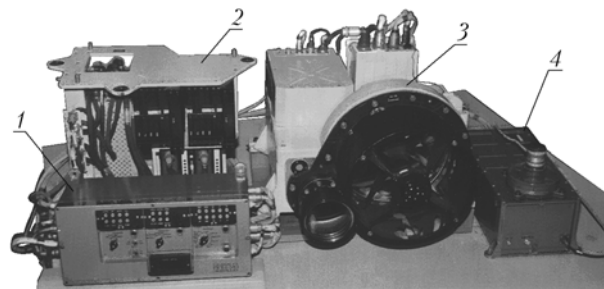


Рис. 2. Лидар: 1 — пульт управления (ППУ-20); 2 — блок регистрации точной дальности (дальномерный канал); 3 — приемопередающее устройство; 4 — блок АЦП (УИЗ-27)

Подготовка лидара к запуску на орбиту

Новый цикл работ по лидару возобновился в 1994 г., когда NASA решило провести отработку стыковок своих Space Shuttle с ОС «Мир» и в соответствии с российско-американским соглашением «Черномырдин–Гор» в конце 1993 г. на космическую программу России было выделено дополнительное финансирование (по неофициальным данным несколько сотен миллионов долларов). В связи с этим было принято решение провести подготовку к запуску модулей ОС «Мир» — «Спектр» и «Природа» [18]. На последнем модуле готовился к запуску российско-французский лидар ALISSA [9]. В связи с продолжением работ по дооснащению ОС «Мир» новым оборудованием представителям ИОА и СКБ было предложено приехать в РКК «Энергия» для расконсервации и подготовки к запуску блоков лидара БАЛКАН.

В конце 1994 г. А.А. Тихомиров, В.В. Бурков и представитель заказчика Ю.М. Соколов в РКК «Энергия» в течение месяца из двух штатных комплектов лидара собрали один работающий образец, провели необходимый объем испытаний, которые подтвердили работоспособность отдельных блоков и лидара в целом, а также передачу телеметрической информации на борт ОС «Мир» при работе лидара от имитаторов. Были подписаны соответствующие документы, продлевающие гарантийный ресурс работы лидара. В марте 1995 г. лидар в составе модуля «Спектр» был отправлен на космодром.

Последние предстартовые проверки лидара БАЛКАН были проведены на космодроме Байконур в апреле 1995 г., сначала автономные испытания, затем в составе модуля «Спектр». А.А. Тихомировым в формуляре лидара были записаны ключевые слова «Изготовлен по НА-76. Пожаровзрывобезопасен. Годен для установки на ПКК». В мае 1995 г. модуль «Спектр» был выведен на орбиту и пристыкован к ОС «Мир».

Эксперименты по лазерному зондированию из космоса

По графику работ на станции экипаж экспедиции ЭО-19 к экспериментам с лидаром приступил в конце июля 1995 г. после проведения стыковки

всех электрических кабелей между модулем «Спектр» и ОС. Первые тестовые включения лида-ра без вывода излучения в атмосферу выполнены космонавтом Н.М. Бударным 1 августа 1995 г. Правильность выполнения операций по ручному управлению лидаром контролировалась нами в Центре управления полетом (ЦУП) по сигналам получаемой телеметрической информации. Все блоки лида-ра отработали без замечаний, лидар был включен в состав действующей научной аппаратуры ОС и допущен к проведению экспериментов по лазерному космическому зондированию с борта ОС «Мир».

Для организации этих экспериментов авторам статьи пришлось основательно ознакомиться с баллистикой полета ОС «Мир» на орбите [23] и уточнить привязку оптической оси лида-ра к связанной системе координат (ССК) станции. На рис. 3 приведена схема размещения лида-ра на ОС.

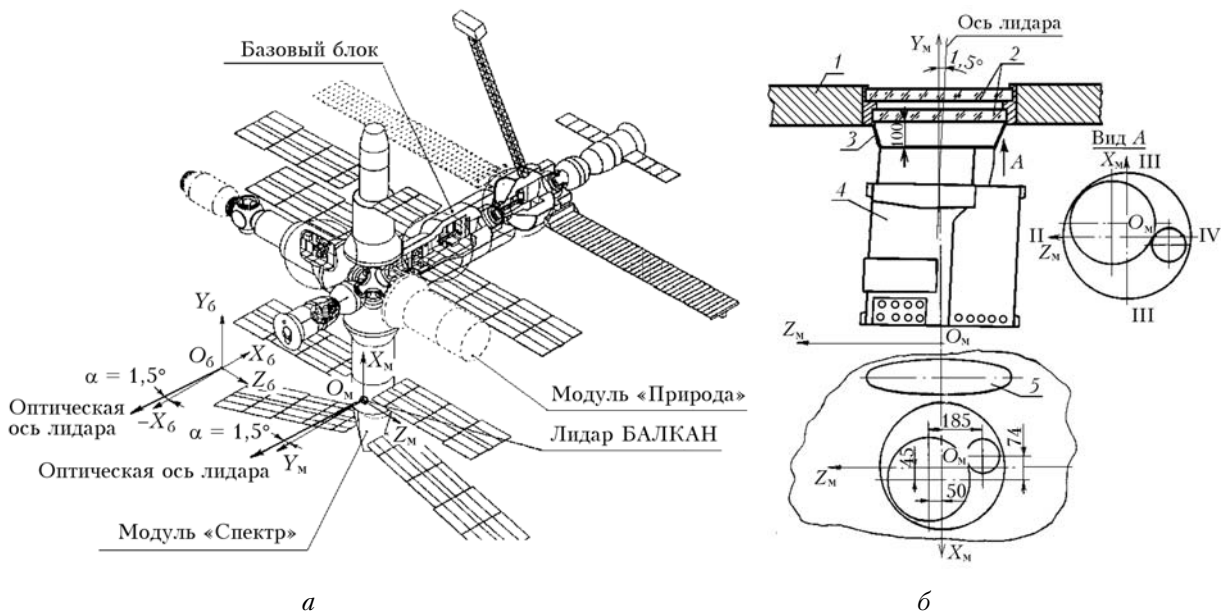


Рис. 3. Размещение лида-ра на модуле «Спектр» ОС «Мир» и привязка оптической оси лида-ра к ССК модуля и базового блока станции: *a* – общий вид ОС (центры систем координат станции $O_6X_6Y_6Z_6$ и модуля $O_MX_MY_MZ_M$ для наглядности изображения направлений вынесены из соответствующих центров масс); *б* – схема расположения приемопередающего блока лида-ра на иллюминаторе модуля (1 – корпус модуля; 2 – стекла иллюминатора; 3 – светозащитная бленда; 4 – приемопередающее устройство; 5 – наружная крышка иллюминатора)

Для устранения засветок фотоприемного блока от лазерного излучения, переотражаемого от четырех оптических поверхностей иллюминатора, направление оптической оси лида-ра составляло $1,5^\circ$ относительно оси иллюминатора. Последняя, в свою очередь, параллельна направлению оси модуля O_MY_M или оси « $-O_6X_6$ » ОС (рис. 3, *a*).

На рис. 4 показаны режимы ориентации ОС на орбите. Базовая система координат (БСК) предназначена для ориентации движущейся ССК ОС в инерциальном пространстве [23]. При описании движения лида-ра в ОС на орбите использовались две БСК [20, 24, 25]. Инерциальная система координат (ИСК) имеет центр, совпадающий с центром масс Земли, ось O_nX_n направлена в среднюю точку

весеннего равноденствия, ось O_nZ_n перпендикулярна плоскости среднего экватора и направлена в сторону Северного полюса Земли, ось O_nY_n дополняет систему до правой.

Орбитальная система координат (ОСК) имеет начало координат, совпадающее с центром масс ОС, ось O_oX_o направлена по проекции вектора скорости ОС на плоскость местного горизонта, ось O_oY_o направлена по радиусу-вектору ОС, ось O_oZ_o дополняет систему до правой.

Основным режимом ориентации ОС в полете являлся режим ИСК, что было связано с наилучшими условиями энергообеспечения ОС от Солнца (постоянная ориентация панелей солнечных батарей). При таком режиме полета ОС ось лида-ра оказывалась наиболее близкой к надирному направлению ($\gamma \approx 0^\circ$) только в краткие моменты времени – в середине света на витке (рис. 4, *a*).

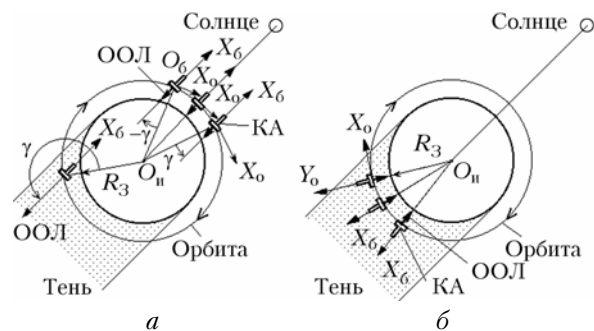


Рис. 4. Режимы ориентации ОС на орбите: ООЛ – оптическая ось лида-ра; γ – угол между надиром и направлением ООЛ; O_n – центр инерциальной системы координат (Земли); *a* – режим ориентации ИСК; *б* – режим ориентации ОСК

Но в этом случае условия работы лидара оказывались наиболее худшими по фоновым засветкам (наибольшая высота Солнца над горизонтом). Кроме того, наклонная дальность зондирования во время полета ОС в таком режиме все время менялась, а при полете на теневой стороне Земли ось лидара направлена вне ее поверхности.

Наиболее благоприятным режимом ориентации ОС для проведения экспериментов был режим ОСК, когда оптическая ось лидара была близка к надирному направлению на любой стороне Земли (рис. 4, б). В режиме расчетной ОСК с заданного момента времени осуществлялась требуемая ориентация осей ОС относительно осей ОСК, а затем поддерживалась стабилизация режима полета в этой ориентации на время проведения космического эксперимента, после чего ОС снова переводилась в режим ориентации ИСК. Однако перевод стотонной ОС в режим полета ОСК, стабилизация этого режима и обратный перевод ОС в основной режим полета требовали значительного расхода горючего, поэтому режим ОСК был реализован за менее половины сеансов зондирования.

Следует отметить еще одну особенность лазерного зондирования с борта подвижных носителей. Коэффициент распределения лазерных пятен на земной поверхности определяется по соотношению [26]:

$$q = L / D = V / H\theta_0 f,$$

где L — расстояние между центрами лазерных пятен; D — размер лазерного пятна на поверхности Земли; V — скорость полета носителя; H — высота полета; θ_0 — расходимость лазерного излучения; f — частота посылок лазерных импульсов. При $q < 1$ имеется случай перекрытия лазерных пятен на поверхности, при $q > 1$ — случай разделенных пятен. Для лидара БАЛКАН при малой частоте $f = 0,18$ Гц, узкой расходимости $\theta_0 = 0,15$ мрад и средней высоте полета ОС $H = 400$ км мы имели $D \approx 60$ м при $L \approx 42,6$ км.

Первый цикл сеансов лазерного зондирования с борта ОС был выполнен в августе—сентябре 1995 г. космическими экспедициями ЭО-19 (космонавты Н.М. Бударин и А.Я. Соловьев) и ЭО-20 (космонавт Ю.П. Гидзенко), второй цикл в феврале—апреле 1996 г. экспедициями ЭО-20 и ЭО-21 (космонавт Ю.И. Онуфриенко) при непосредственной организации и сопровождении космических экспериментов Ю.С. Балиным и А.А. Тихомировым в Центре управления полетами [28]. Методические основы постановок экспериментов по лазерному зондированию с борта ОС «Мир» приведены в [20, 24, 25].

При проведении первого цикла экспериментов выяснилось, что дальномерный канал лидара [17] регистрирует сигналы от облаков и земной поверхности нормально, а в блоке АЦП сигналы не регистрируются. При анализе отказа выяснилось, что в соответствии с ТЗ на лидар первоначальная высота орбиты ОС «Мир» предполагалась равной 300–350 км и временные ворота АЦП были настроены на этот интервал. Однако при большой массе и га-

баритах ОС ее высоту стали удерживать в пределах 390–415 км, чтобы меньше сказывалось торможение атмосферы. В связи с этим был доработан один из оставшихся штатных образцов блока, проведены его соответствующие испытания и в начале 1996 г. грузовым КА «Прогресс» блок был доставлен на станцию. В соответствии с составленными инструкциями космонавты провели замену блока и продолжили эксперименты по лазерному зондированию атмосферы. Сигналы от облаков и земной поверхности стали регистрироваться АЦП. Но в связи с увеличением высоты полета ОС амплитуда регистрируемых сигналов была мала и сигналы регистрировались только от плотных облаков и ПП.

Было принято решение доработать один из двух последних запасных блоков УИЗ-27, оставшихся на Земле, с целью повышения его чувствительности. Доработанный блок был доставлен на борт ОС «Мир» весной 1997 г. Но в июне 1997 г. космонавты ЭО-23, перестыковывая КА «Прогресс М-34» с одного стыковочного узла станции на другой при ручном управлении полетом этого КА вокруг ОС, повредили корпус модуля «Спектр», в результате чего произошла разгерметизация модуля и переход в него был задрен [18]. Все эксперименты, которые проводились на научной аппаратуре в этом модуле, были прекращены. В итоге лидар БАЛКАН за весь период эксплуатации на борту ОС «Мир» отработал не более 15% своего ресурса, который в основном определялся ресурсом лазера. Описание полученных результатов при проведении космических экспериментов представлено в [20, 24, 25, 27–32]. На рис. 5 показаны участки подспутниковых трасс, на которых проводилось зондирование облачных образований и подстилающей поверхности Земли (суши и океана).

На рис. 6 представлены результаты зондирования океанической поверхности с учетом ориентации оптической оси лидара в БСК [32] в двух режимах ориентации ОС.

Дальнометрирование океанической поверхности, рассматриваемой на первом этапе измерений в качестве опорной, позволяет оценить вклад различных источников в погрешность измерений. При этом сравнивались измеренные лидаром $D_n(t)$ и расчетные $D_p(t)$ значения наклонной дальности и расчетной высоты полета ОС $H_p(t)$ (по данным расчетов группы математического моделирования ЦУП), а также учитывались данные телеметрической информации (ТМИ), поступавшей от гироскопических датчиков системы управления движением ОС.

На рис. 6, а, представлены значения разности $\Delta D = D_n(t) - D_p(t)$, по оси абсцисс отложен номер цикла зондирования N в сеансе измерений, а баллистические расчетные значения $D_p(t)$ интерполированы на период следования лазерных импульсов T_d , считая, что $t = 0$ при $N = 1$. Прямыми линиями изображены тренды разности ΔD . Одна из причин различного наклона трендов связана с разной ориентацией осей ССК ОС и, соответственно, оптической оси лидара относительно направления полета в каждом из проведенных сеансов зондирования [32].

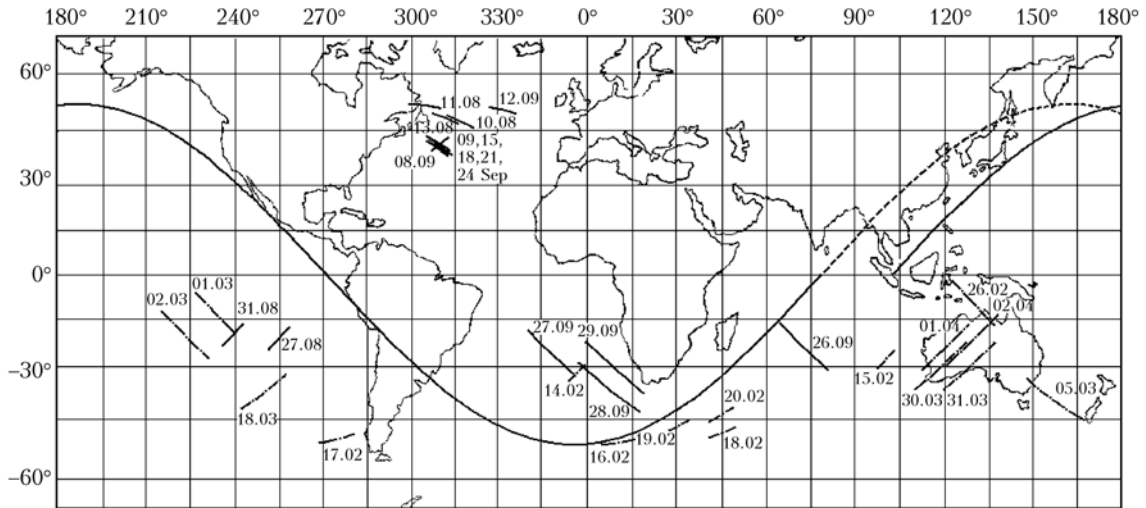


Рис. 5. Проекция траектории орбиты ОС «Мир» на земную поверхность и участки подспутниковых трасс, где проводились эксперименты по лазерному зондированию. Сплошные отрезки – зондирование в 1995 г., штрихпунктирные – в 1996 г.

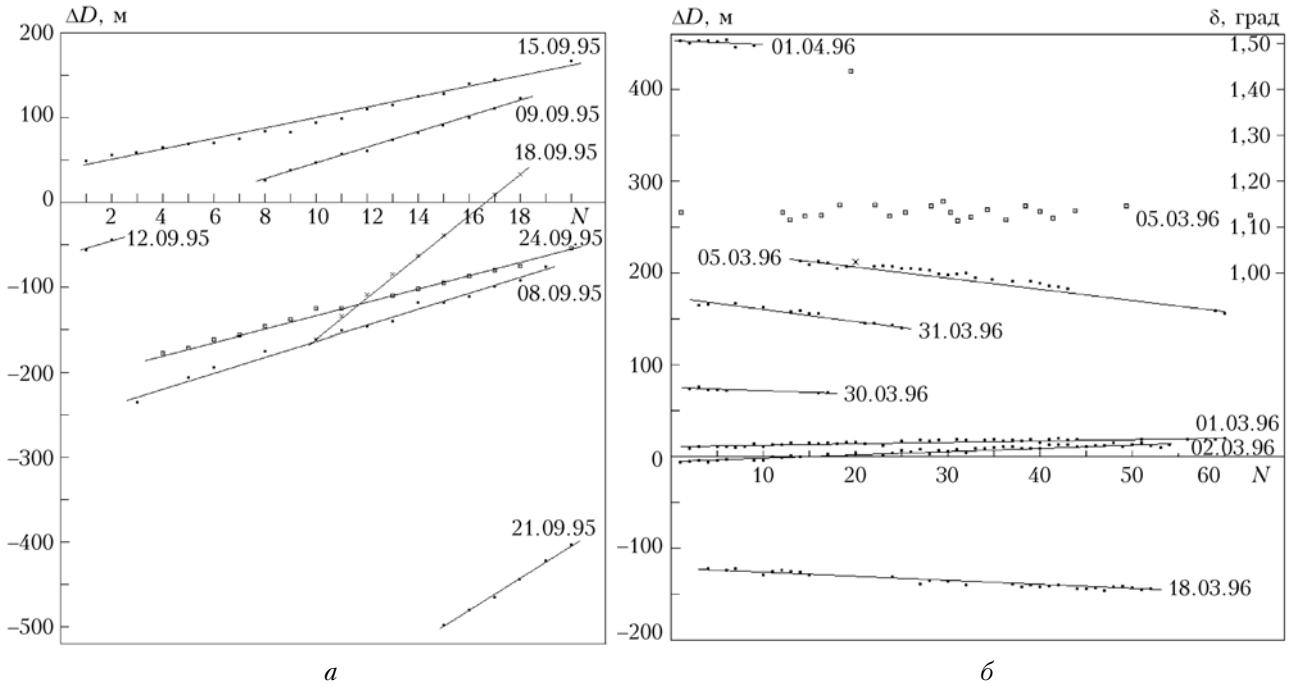


Рис. 6. Разность измеренных и расчетных значений дальности при дальнометрировании океанической поверхности: *a* – в режиме ориентации ИСК; *б* – в ОСК

Для сеансов измерений 1995 и 1996 гг., проводимых в режиме ориентации ИСК, было характерным прекращение регистрации отраженных сигналов от океанической поверхности, когда угол γ (см. рис. 4, *a*) превышал 10° . В этом случае за счет наклонного падения зондирующего луча длительность эхосигнала возрастает, а его амплитуда уменьшается [33] и при малом значении коэффициента отражения ρ водной поверхности, по сравнению с облаками или пустынной поверхностью, становится ниже первого порогового уровня дальномерного канала лидара. Как показывают результаты работы [34], при $\gamma \geq 10^\circ$ за счет угловой зависимости коэффициента отражения $\rho(\gamma)$ дополнительно ампли-

туда эхосигнала уменьшается в 2–3 раза (в зависимости от скорости ветра и волнения на океанической поверхности).

На рис. 6, *б* точками представлены значения $\Delta D = D_n(t) - H_p(t)$, полученные при дальнометрировании южных частей Тихого и Индийского океанов при полете ОС в режиме ориентации ОСК. Пропуски точек на зависимостях ΔD обусловлены эхосигналами от верхней границы облаков, дальность до которой не входит в масштаб рисунка. Этим же объясняется непредставление результатов измерений в начале сеанса 5 марта и во второй половине сеансов 30, 31 марта и 1 апреля, когда подстилающей поверхностью был Австралийский кон-

тинент. Сплошной линией показаны тренды ΔD . Результаты анализа ориентации ОС по данным ТМИ показывают, что даже в режиме ориентации ОСК имеются колебания ССК ОС в БСК–ОСК. Для примера в правой части рис. 6, б квадратиками показаны измеренные значения колебаний угла δ между осями $+O_0Y_0$ и $+O_0X_0$ (см. рис. 3, а и 4, б) в сеансе зондирования 5 марта 1996 г. В соответствии с этим происходило и колебание оптической оси лидара в сеансах зондирования, что является одной из возможных причин колебания значений ΔD (рис. 6, б).

Некоторые возможные погрешности определения дальности до подстилающей поверхности и/или верхней границы облачности с помощью лазерных космических альтиметров и лидаров теоретически рассматривались в [5, 33]. В целом можно выделить следующие причины погрешности измерений: 1) неточное знание высоты полета космического аппарата; 2) неопределенность в ориентации оптической оси лидара в сеансах измерений; 3) аппаратные погрешности измерителя; 4) методика измерений и обработки результатов и 5) коэффициент преломления атмосферного воздуха и его изменения на трассе распространения лазерного луча.

Следует отметить, что малое число проведенных экспериментов за двухлетний период функционирования модуля «Спектр» было обусловлено также тем, что иллюминатор большого диаметра ($\varnothing 400$ мм) на этом модуле использовался для проведения космических экспериментов по другим про-

граммам. На время их проведения приемопередатчик лидара демонтировался с этого иллюминатора.

Российско-французский лидар «ALISSA» работал на ОС «Мир» в течение 1996–1998 гг. При его разработке и эксплуатации на борту ОС учитывался опыт разработки и проведенных экспериментов с лидаром БАЛКАН. В таблице для сравнения представлены технические характеристики трех первых космических лидаров.

В целом работы на ОС «Мир» были прекращены в 1999 г. после вывода на орбиту международной космической станции. А так как одновременное управление из ЦУПа двумя крупными космическими станциями было затруднительным, то в марте 2001 г. станция «Мир» была выведена с орбиты и затоплена в Тихом океане [18].

Заключение

Следует отметить, что нами рассматривались (на этапе технических предложений) и другие варианты космических лидаров [35, 36], но на их реализацию нет достаточного финансирования. Эффективность космического лазерного зондирования атмосферы в настоящее время демонстрирует орбитальный лидар CALIPSO, выведенный на орбиту NASA (США) в мае 2006 г. [37]. Институт оптики атмосферы участвует в Международной программе QPQ по валидации данных космического лидара. Для этого используется наземный лидар ЛОЗА-S.

Сравнительные параметры лидаров космического базирования

Параметр	Единица измерения	LITE			БАЛКАН	ALISSA
Длина волны зондирования	нм	355	532	1064	532	532
Выходная энергия	мДж	150	460	500	150	40 (4 лазера)
Длительность импульса излучения	нс	31	27	27	12	15
Расходимость излучения	мрад	0,6	0,6	1,0	0,15	0,5
Частота посылок импульсов	Гц	10	10	10	0,18	50
Световой диаметр приемного телескопа	мм	985			275	400
Угол поля зрения	мрад	1,1			0,44	0,5
Режим работы фотоприемника		аналоговый			аналоговый	счетно-фотонный
Пространственное разрешение по высоте	м	15			3	150
Потребляемая мощность	Вт	2000			200	3000
Космическая платформа		челнок «Discovery»			орбитальная станция «Мир»	модуль «Природа»
Средняя высота орбиты	км	240			400	400
Угол наклона орбиты	град	57			51,7	51,7
Расстояние между точками измерений	км	0,7			42,6	0,9
Время функционирования		9 сут			в сентябре 1994 г. 1995–1996 гг. 1996–1998 гг.	

Авторы считают своим долгом поблагодарить всех сотрудников, принимавших участие в разработке и испытаниях космического лидара БАЛКАН. Особо хочется отметить сотрудников ИОА СО РАН: д.ф.-м.н. И.В. Самохвалова, к.ф.-м.н. В.С. Шаманаева, к.ф.-м.н. С.В. Самойлову, с.н.с. В.В. Буркова, а также сотрудников СКБ НИП «Оптика»: ведущего конструктора В.С. Ильичевского, зав. сектором О.Н. Номикоса и инженера А.Б. Невиницина.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Госконтракт № 16.518.11.7067).

1. Малкевич М.С. Оптические исследования со спутников. М.: Наука, 1972. 303 с.
2. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 280 с.
3. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанологии и гидрологии: Пер. с англ. / Под ред. А. Крэнкелла. М.: Мир, 1984. 535 с.
4. Лазарев А.И., Коваленок В.В., Авакян С.В. Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 399 с.
5. Лазерное зондирование атмосферы из космоса / Под ред. В.М. Захарова. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 215 с.
6. Conference abstracts. 9th Int. Laser Radar Conf. Munich, 1979. 198 p.
7. McCormick M.P., Winker D.M. Observation of aerosol and clouds with LITE // Abstracts European Symposium. Satellite Remote Sensing II. Conf. Lidar Techniques for Remote Sensing II. Paris, 1995. P. 25.
8. Balin Yu.S., Burkov V.V., Znamenskii I.V., Zuev V.E., Efimkin V.I., Il'ichevskii V.S., Mel'nikov V.E., Samokhvalov I.V., Sobolev V.N., Tikhomirov A.A. Spaceborne aerosol lidar BALKAN-1 // Abstracts of papers 15th ILRC. Tomsk, 1990. Part I. P. 12–14.
9. Тулинов Г.Ф., Мельников В.Е., Жидкова М.Б., Шанен М.Л., Малик К., Дебуа М. Космический лидар «Алиса» для орбитальной станции «Мир» // Инж. экол. 1996. № 5. С. 80–91.
10. Абрамочкин А.И., Ваулин П.П., Самохвалов И.В., Тихомиров А.А. Устройство измерения прозрачности атмосферы по наклонным трассам // III Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере: Тезисы докл. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1975. С. 279–280.
11. Самохвалов И.В., Шаманаев В.С. Самолетные лидары и их применение. Депон. в ВИНТИ 29.03.88. № 2403-B88. 38 с.
12. Кабанов М.В., Тихомиров А.А. Конструкторско-технологическое обеспечение фундаментальных исследований по атмосферной оптике: Итоги деятельности КТИ «Оптика» СО РАН за 25 лет // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10, № 4–5. С. 382–402.
13. Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Гейко П.П., Горобец В.А., Ланская О.Г., Петухов В.О., Солдаткин Н.П., Тихомиров А.А. Лидарные системы и их оптико-электронные элементы / Под общ. ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. 526 с.
14. Захаров В.М., Костко О.К. Лазерная метеорологическая локация. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 222 с.
15. Zuev V.E., Kavkyanov S.I., Krekov G.M. Interpretation of data on laser sensing of aerosol atmosphere from space // Adv. Space Res. 1985. V. 5, N 6. P. 81–85.
16. Зув В.Е., Иваненко Б.П., Наиз И.Э. К оценке эффективности лазерного зондирования атмосферного озона с борта ИСЗ // Исслед. Земли из космоса. 1985. № 5. С. 117–122.
17. Балин Ю.С., Знаменский И.В., Зув В.Е., Мельников В.Е., Тихомиров А.А., Самойлова С.В. Российский космический лидар БАЛКАН-1 // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 9. С. 1332–1343.
18. URL: <http://galspace.spb.ru/index69-2.html> (дата обращения: 25.07.2011)
19. Балин Ю.С., Знаменский И.В., Мельников В.Е., Тихомиров А.А. Комплекс наземной контрольно-проверочной аппаратуры для российского космического лидара БАЛКАН-1 // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9, № 3. С. 359–366.
20. Балин Ю.С., Тихомиров А.А. Лидар космического базирования БАЛКАН // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. С. 78–111.
21. Балин Ю.С., Васильев В.П., Гараймович Н.П., Грачев Ю.Н., Ермашкевич Ю.Б., Знаменский И.В., Тихомиров А.А. Бортовой космический лидар // Электромагнитные волны и электронные системы. 1997. Т. 2, № 4. С. 47–54.
22. Зув В.Е., Балин Ю.С., Тихомиров А.А., Знаменский И.В., Мельников В.Е. Лазерное зондирование Земли из космоса. I. Российский лидар космического базирования БАЛКАН // Космічна наука і технологія. 1997. Т. 3, № 1–2. С. 16–25.
23. Методика П24586-117. Ч. 1. Кн. 1. НПО «Энергия». 1986. 48 с.
24. Балин Ю.С., Тихомиров А.А. Лазерное зондирование Земли из космоса. II. Методологические основы лидарных измерений с борта орбитальной станции // Космічна наука і технологія. 1997. Т. 3, № 1–2. С. 26–33.
25. Балин Ю.С., Самойлова С.В., Тихомиров А.А. Предварительные результаты зондирования облаков и подстилающей поверхности Земли лидаром БАЛКАН // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10, № 3. С. 333–352.
26. Тихомиров А.А., Береснев А.В., Абрамочкин А.И. Сканер на основе вращающихся оптических клингов и его возможности для самолетного лидара // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13, № 4. С. 407–414.
27. Зув В.Е., Балин Ю.С., Матвиенко Г.Г., Тихомиров А.А., Шаманаев В.С. Лидарные исследования облачных полей и подстилающей поверхности из космоса // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10, № 4–5. С. 485–499.
28. Балин Ю.С., Мельников В.Е., Попов К.Н., Авдеев С.В., Гидзенко Ю.П., Онуфrienко Ю.И., Усачев Ю.В., Тихомиров А.А. Реализация прикладных экспериментов с лидаром БАЛКАН-1 на орбитальной станции «Мир» // 3-я Междунар. практ. конф. по проблемам информационного обеспечения подготовки и профессиональной деятельности операторов аэрокосмических систем: Тезисы докл. Звездный: ЦПК, 1997. С. 43–52.
29. Тихомиров А.А., Балин Ю.С., Мельников В.Е. К оценке наклонной дальности, измеряемой лидаром БАЛКАН с борта орбитальной станции «Мир» // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11, № 7. С. 768–775.
30. Балин Ю.С., Самойлова С.В., Тихомиров А.А. Лазерное зондирование Земли из космоса. III. Результаты космических экспериментов по зондированию подстилающей поверхности и облаков лидаром БАЛКАН

- // Космічна наука і технологія. 1998. Т. 4, № 1. С. 22–28.
31. *Shamanaev V.S., Tikhomirov A.A.* Analysis of data on ranging of the ocean surface with the BALKAN lidar // Proc. SPIE. 1999. V. 3865. P. 180–186.
 32. *Тихомиров А.А.* Результаты дальнометрирования океанической поверхности космическим лидаром БАЛКАН // Космічна наука і технологія. 1999. Т. 5, № 2–3. С. 22–30.
 33. *Bufton J.L.* Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft // Proc. IEEE. 1989. V. 77, N 3. P. 463–477.
 34. *Bufton J.L., Hoge F.E., Swift R.N.* Airborne measurements of laser backscatter from the ocean surface // Appl. Opt. 1983. V. 22, N 17. P. 2603–2618.
 35. *Зуев В.Е., Балин Ю.С., Зуев В.В., Матвиенко Г.Г., Тихомиров А.А.* Состояние и перспективы развития космических лидаров серии БАЛКАН // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 12. С. 1718–1726.
 36. *Matvienko G.G., Zuev V.E., Shamanaev V.S., Kokhanenko G.P., Sutormin A.M., Buranskii I.I., Belousov S.E., Tikhomirov A.A.* Lidar BALKAN-2 for space platform «ALMAZ-1B» // Proc. SPIE, Europto series «Lidar Techniques for Remote Sensing». 1994. V. 2310. P. 161–163.
 37. *Kovacs T.A., McCormick M.P.* Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO). *Quid Pro Quo* Validation Plan, Hampton university (2005). URL: http://calipsovalidation.hamptonu.edu/QPQ_plan062206.htm

***Yu.S. Balin, A.A. Tikhomirov.* The history of development and operation of the first Russian space lidar BALKAN integrated into Mir space station.**

The history of development and ground and flight tests of the first Russian space lidar BALKAN is described. Some experimental results are presented obtained when sounding clouds and underlying surface from the Mir space station. Comparison is made between the first space lidars LITE, BALKAN, and ALISSA.