

УДК 551.501

**Лазерное зондирование Земли из космоса.
III. Результаты космических экспериментов
по зондированию подстилающей поверхности
и облаков лидаром БАЛКАН**

Ю. С. Балин¹, С. В. Самойлова¹, А. А. Тихомиров²

¹Институт оптики атмосферы СВ РАН, Томськ, Росія

²Институт оптического мониторингу СВ РАН, Томськ, Росія

Надійшла до редакції 08.10.97

Приведені деякі результати вимірювань, отримані за допомогою лідара БАЛКАН у 1995—1996 рр. у сеансах зондування поверхні океану, дільниць суші та хмарних полів, та виконані в різних регіонах земної кулі при різноманітній світлотіньовій обстановці у двох режимах орієнтації орбитальної станції «Мир».

ВВЕДЕНИЕ

Первые экспериментальные результаты по лазерному зондированию Земли и ее атмосферы из космоса получены с помощью американского лидара, работавшего по программе LITE (Lidar In-Space Technology Experiment) в сентябре 1994 г. на челноке «Discovery» [9]. Методы обработки обширного экспериментального материала, включающего также данные подспутниковых лидарных измерений, стали одной из центральных тем последних Международных симпозиумов по спутниковому зондированию атмосферы. Доклады этих симпозиумов опубликованы в Трудах Международного общества по оптической технике [5—7].

Поскольку лидары космического базирования находятся на первоначальной стадии внедрения в практику дистанционного мониторинга окружающей среды, то американский эксперимент LITE носил в основном технологический отработочный характер. То же самое можно сказать и про первые эксперименты с российским космическим лидаром БАЛКАН, имеющим отличия от американского

аналога. Эти отличия касаются как непосредственно специфики использования лидара на орбитальной станции «Мир», так и особенностей самой аппаратуры (узкое поле зрения, два приеморегистрирующих канала и т. д., см. [1, 4]).

Основная цель программы наших экспериментов 1995—1996 гг. заключалась в технологической проверке работоспособности лидара БАЛКАН, экспериментальном подтверждении его технических характеристик, отработке методик проведения космического и подспутникового экспериментов и методик обработки лидарной информации.

**ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ
ПРОВЕДЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Экипаж орбитальной экспедиции ЭО-19 приступил к работам с лидаром БАЛКАН в конце июля 1995 г. после проведения стыковок всей кабельной сети между модулем «Спектр» и орбитальной станцией «Мир». Первые тестовые включения лидара (без вывода излучения в атмосферу) выполнены космо-

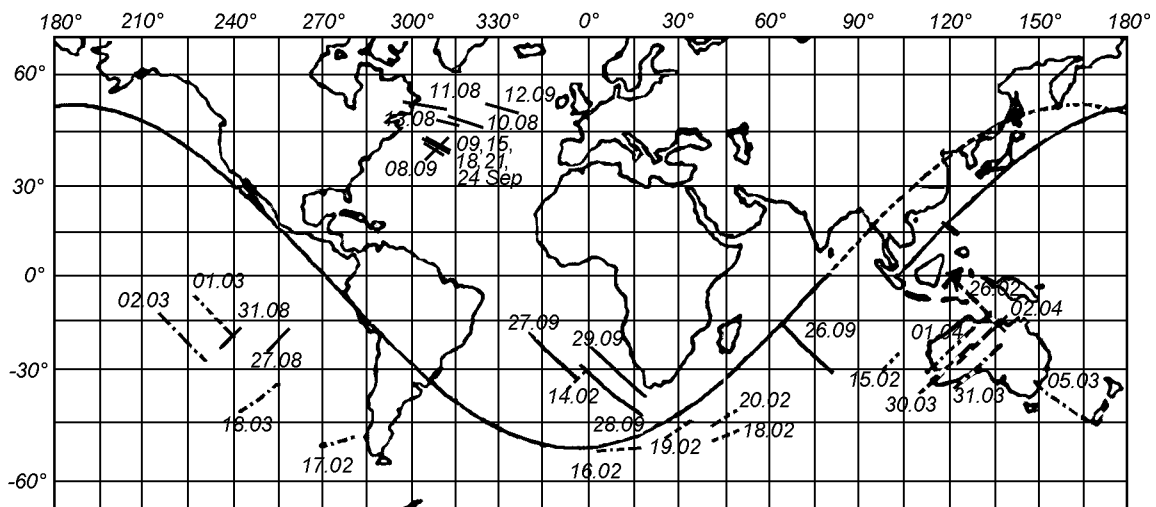


Рис. 1. Проекция трасс полета станции «Мир» при проведении сеансов лазерного зондирования

навтом Н. Будариним 01.08.95. Правильность выполнения операций по ручному управлению лидаром контролировалась нами по сигналам телеметрического контроля, передаваемым сразу в ЦУП, поскольку станция в это время находилась в зоне радиосвязи с наземным измерительным комплексом. Все системы отработали без замечаний и лидар был включен в состав действующей научной аппаратуры станции.

Исходя из режимов ориентации станции «Мир» в полете и графика загруженности космонавтов другими работами, выбор районов зондирования был ограничен. На рис. 1 представлены географические районы проведения космических экспериментов в 1995—1996 гг. Для примера на нем также изображена проекция на земную поверхность одного витка, начинающегося при долготе экватора 103° в. д., пунктиром показано продолжение следующего витка. Эксперименты проводились в двух режимах полетной ориентации станции «Мир» — в инерциальной системе координат 2 (ИСК2) и в расчетной орбитальной системе координат (ОСКр). Детально особенности ориентации осей станции в этих системах координат и соответственно оптической оси лидара относительно надирного направления описаны в наших работах [1, 2]. Сплошными отрезками на рисунке изображены проекции участков орбит, где выполнялись эксперименты по зондированию осенью 1995 г. Не считая обязательных тестовых включений лидара, проведено 16 сеансов, из них только 3 в режиме ориентации ОСКр (в первой половине августа). Наибольшее число экспериментов выполнено над районом юго-восточнее п-ова Лабрадор, где с борта научно-исследовательского

судна «Академик М. Келдыш» проводились сопутствующие подспутниковые синхронные измерения атмосферы и океана, в том числе и лидарными средствами. Штрих-пунктирные отрезки на рис. 1 соответствуют экспериментам 1996 г. Проведено 17 сеансов зондирования, из них 8 в ОСКр на теневой стороне Земли (март—апрель). В основном зондировалась атмосфера и поверхность океана в южном полушарии и различные участки пустынной Австралии.

При 20 импульсах в сеансе измерений его длительность составляет 105 с (длина зондируемой трассы около 807 км), при 60 импульсах — 326 с (≈ 2505 км). Во время проведения сеансов измерений на теневой стороне Земли чувствительность лидара повышалась за счет увеличения напряжения питания ФЭУ [4].

При работе лидара в ночных условиях в ориентации ОСКр число достоверных измерений в сеансе зондирования по дальномерному каналу не менее 75 % при наличии облачности и более 90 % при получении сигналов от подстилающей поверхности (в остальных случаях сигналы не регистрировались от облаков с малой оптической плотностью).

В дневных условиях процент достоверных измерений в значительной степени зависел от высоты Солнца над местным горизонтом, угла отклонения оси зондирования от надира, вида облачности и подстилающей поверхности и составлял от 10 до 90 % для различных сеансов зондирования. При отклонении оси зондирования от надира на угол более 10° число достоверных измерений резко сокращалось (при зондировании океанической поверхности). Зондирование в режиме полета ИСК2

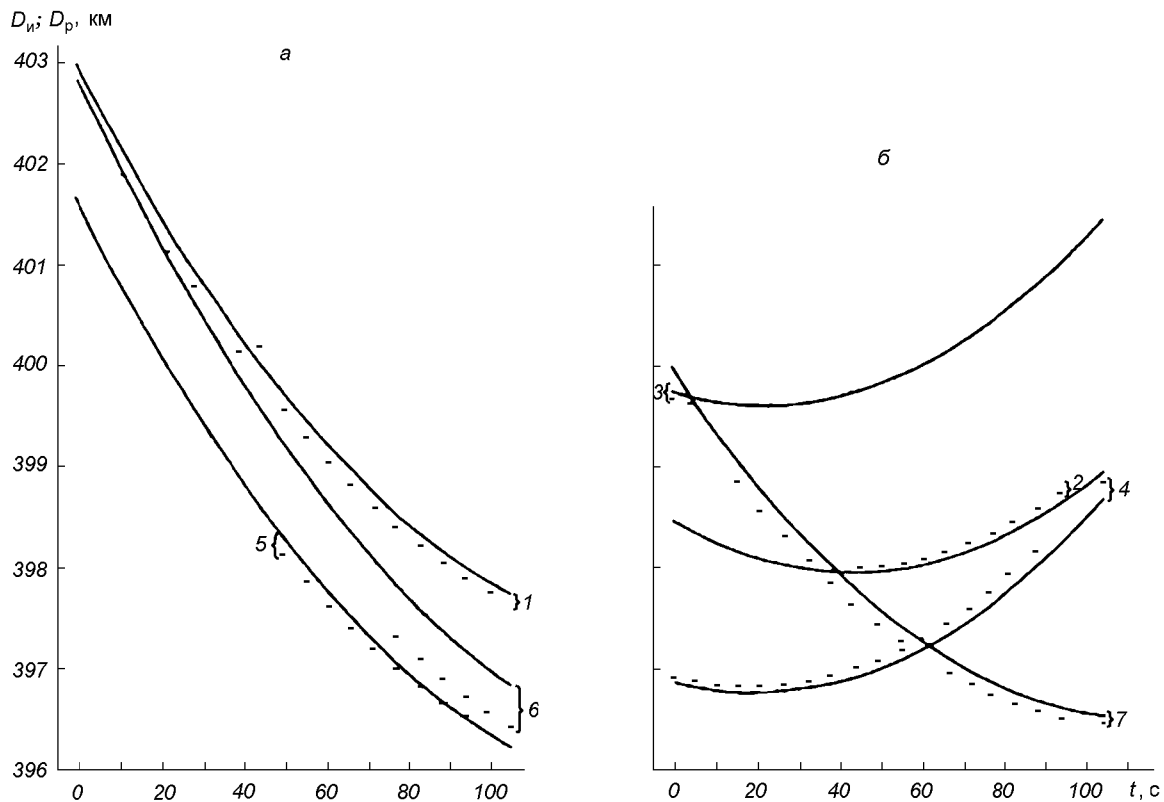


Рис. 2. Сравнение результатов дальнометрирования океанической поверхности с расчетной наклонной дальностью в режиме ориентации ИСК2: *a* — измерения, проведенные при приближении оптической оси лидара к надирному направлению, *б* — измерения вблизи надирного направления; 1 — 08.09.95; 2 — 09.09.95; 3 — 12.09.95; 4 — 15.09.95; 5 — 18.09.95; 6 — 21.09.95; 7 — 24.09.95

на участках орбиты близких к высоким широтам (более 45°), в условиях значительной облачности (по данным Гидрометцентра) и большой высоте Солнца дало мало репрезентативных результатов даже в дальномерном канале лидара.

В качестве примера ниже представлены наиболее характерные из полученных результатов измерений.

ЗОНДИРОВАНИЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В ПОЛЕТНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ИСК2

На рис. 2 показаны результаты дальнометрирования океанической поверхности на освещенной стороне Земли при полете станции в режиме ориентации ИСК2. В таком режиме за счет постоянной ориентации станции на Солнце непрерывно изменяются углы курса и тангажа оптической оси лидара относительно вектора скорости станции, а вместе с этим угол γ отклонения оптической оси

лидара от надирного направления, и следовательно, наклонная дальность зондирования [1]. Для сопоставления результатов различных сеансов зондирования по оси абсцисс отложена временная шкала сеанса измерений, в которой первому измерению соответствует нулевой момент времени, а двадцатому — 105 с. По оси ординат отложены расчетные значения наклонной дальности $D_p(t)$, показанные сплошными кривыми, и зарегистрированные значения измеренной лидаром дальности D_n , которые отмечены горизонтальными черточками, поскольку при расшифровке телеметрической информации имеется временная неопределенность в 1 с (из-за нецелого значения периода посылок зондирующих импульсов, равного 5.53 с).

Детальный анализ зависимости величины D_p от t показывает, что она изменяется под действием двух факторов.

Во-первых, за счет эллиптичности орбиты (высота $H_p(t)$ за 1 с изменяется примерно на 10 ± 20 м); во-вторых, при полете в режиме ориентации ИСК2 — за счет непрерывного изменения угла отклоне-

ния γ оптической оси лидара от надирного направления (см. рис. 2 в работе [1]). Действие этих двух факторов приводит к тому, что минимальная величина расчетной наклонной дальности $D_p(t)$ достигается не при минимальном значении угла γ . Знак производной $dH_p(t)/dt$ зависит от того, на восходящей либо нисходящей части витка орбиты производятся измерения, поэтому экстремум функции $D_p(t)$ может опережать или отставать от экстремума функции $\gamma(t)$ на 5—20 с.

Расхождение между расчетным значением наклонной дальности $D_p(t)$ и измеренной дальностью D_{ii} связано с несколькими причинами.

Во-первых, с тем, что D_{ii} отсчитывается от плоскости первой линзы оптической антенны передатчика, а $D_p(t)$ — от центра масс станции, что дает погрешность в 12 м.

Во-вторых, с неточным знанием истинного направления оси лидара относительно связанной системы координат станции (оцениваемая погрешность привязки оптической оси лидара лежит в конусе, имеющем плоский угол при вершине $\Delta\alpha \approx 0.3^\circ$), что в соответствии с рис. 4, приведенным в работе [1], дает в зависимости от величины угла γ изменяющуюся величину ошибки.

В-третьих, с погрешностью расчетного значения $D_p(t)$, которая может достигать 150 м, поскольку исходные данные для расчета $D_p(t)$ берутся из данных радиолокационного контроля параметров орбиты. Пересечение тренда $D_{ii}(t)$ с кривой $D_p(t)$ в двух сеансах зондирования (кривые 2 и 5 на рис. 2) говорит о том, что в эти моменты времени истинное и расчетное значения направления оси лидара находились по разные стороны от плоскости орбиты станции и составляли с ней одинаковый угол.

ЗОНДИРОВАНИЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ОБЛАКОВ В ПОЛЕТНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОСКр

Характерные примеры измеренных профилей (D_p — D_{ii}) высоты верхней границы облачности (ВВГО) и подстилающей поверхности при зондировании в южном полушарии в режиме полета станции ОСКр на теневой стороне Земли представлены на рис. 3. В этом режиме полета оптическая ось лидара была изначально ориентирована в надир, при этом $D_p(t) = H_p(t)$. По шкале абсцисс отложен номер N цикла измерения в сеансе, а точками отмечены результаты измерений. Кроме того, указаны географические координаты начальной и конечной точки сеанса измерений.

При зондировании южной части Тихого океана 1 марта (рис. 3, а) наблюдались поля редких низ-

ких облаков, которые на последнем участке стали почти сплошными. Результаты зондирования сравнивались с метеоданными Гидрометцентра для подспутниковой траектории, которые включали: вид облачности, ее балльность и высоту нижней границы облачности (ВНГО). По данным метеосводки в начале трассы была кучевая облачность (балльность 5—8, ВНГО 600—1000 м), а далее слоисто-кучевая (в середине трассы балльность 5—8, ВНГО 600—1000 м, в конце трассы — балльность 3—6, ВНГО 1000—1500 м).

18 марта (рис. 3, б) лидаром регистрировались облака нижнего и верхнего яруса, причем в конце первой половины трассы зондирования облачность была высокой. По данным Гидрометцентра в начале трассы облачность слоисто-кучевая (балльность 6—9, ВНГО 300—600 м), в середине — кучевая (балльность 3—6, ВНГО 600—1000 м), в конце — отдельные кучевые облака (балльность 0—3, ВНГО 1000—1500 м). С учетом глобальности метеоданных и различием в оцениваемых показателях границы облачности (лидар — верхняя, метеоданные — нижняя) относительное совпадение результатов можно считать удовлетворительным. В отдельных циклах измерений амплитуда сигнала, отраженного от облака не превышала уровень первого порога дальномерного канала лидара и поэтому не регистрировалась [4]. Это отмечено на рисунке словом «нет». Последнее характерно для облачности с большим значением ВВГО.

На рис. 3, в представлены данные зондирования австралийского материка с последующим выходом трассы зондирования на морскую поверхность. В центральной части континента и в северной его части наблюдались поля высокой облачности с ВВГО около 10 км. При большом угле места Луны в фазе, близкой к полнолунью, было одно ложное срабатывание в дальномерном канале от фоновой помехи над морской поверхностью, что отмечено словом «помеха».

Ложное срабатывание пороговой системы дальномерного канала лидара происходит в том случае, когда импульс помехи по амплитуде превышает уровень первого порога и попадает во временные ворота преобразователя время—код [4]. Оно определяется по следующим критериям: либо значение D_{ii} полученного сигнала превышало D_p более чем на величину систематической ошибки измерений (зондирование «вглубь Земли»), либо меньше чем ($D_p - 12$ км), что могло соответствовать сигналу от объектов, расположенных на высотах более 12 км от Земли, где отсутствуют облака большой плотности, которые способен зарегистрировать лидар. В этом сеансе зондирования по данным Гидрометцен-

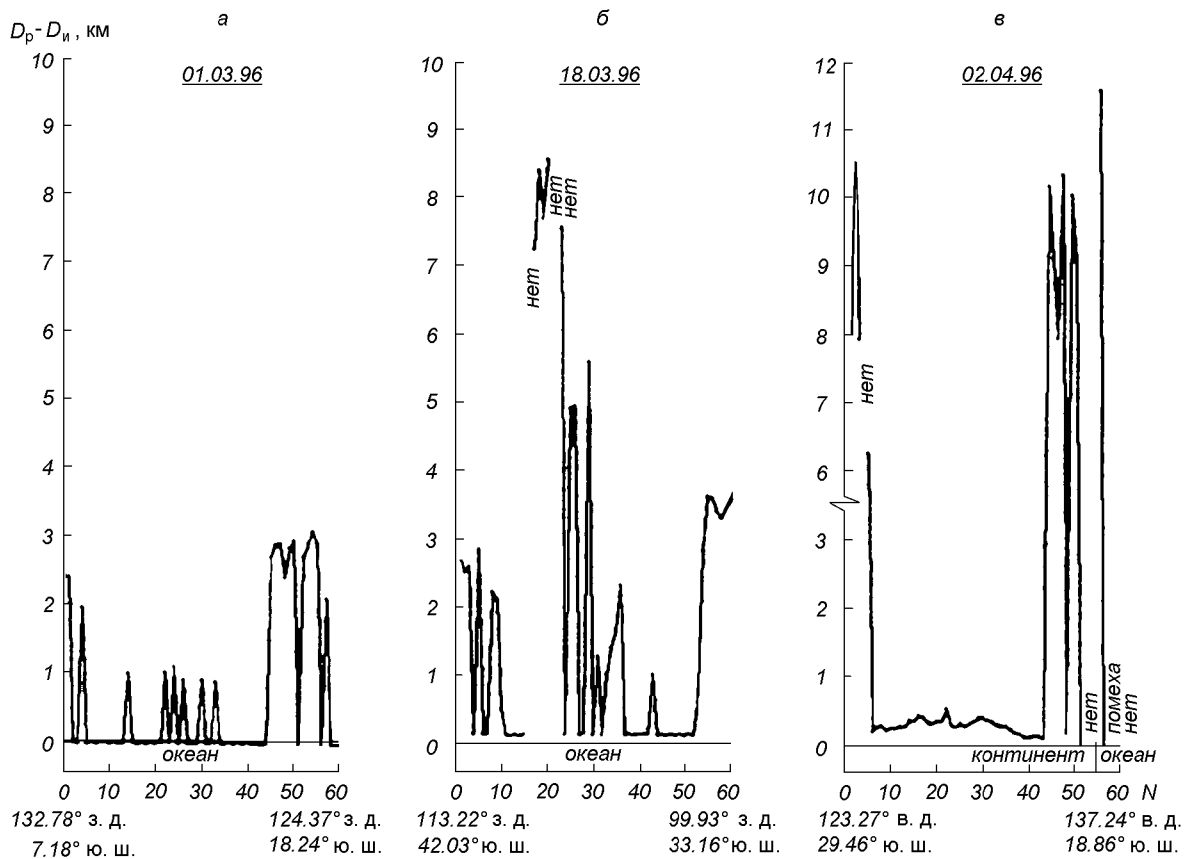


Рис. 3. Профили ВВГО и подстилающей поверхности, измеренные в режиме ориентации ОСКр: а (01.03.96) — $09^{\text{h}}54^{\text{m}}56^{\text{s}} \pm 10^{\text{h}}00^{\text{m}}22^{\text{s}}$ (ДМВ); б (18.03.96) — $10^{\text{h}}25^{\text{m}}00^{\text{s}} \pm 10^{\text{h}}30^{\text{m}}26^{\text{s}}$; в (02.04.96) — $13^{\text{h}}50^{\text{m}}59^{\text{s}} \pm 13^{\text{h}}56^{\text{m}}25^{\text{s}}$

тра в начале трассы — перистые облака (балльность 0—3, ВНГО более 2.5 км), в середине — слоисто-кучевые (балльность 1—4, ВНГО 1000—1500 м), в конце трассы — кучево-слоистые облака (балльность 3—6, ВНГО 600—1000 м). При этом расхождение между данными лидара и метеосводкой наибольшие. В качестве интересного момента следует отметить фиксирование устойчивых облачных полей на высотах от 7 до 12 км над пустынной территорией Австралии, которые наблюдались в ночное время в течение четырех суток подряд 30, 31 марта и 1, 2 апреля 1996 г.

Как видно из рис. 3 и результатов других сеансов зондирования, величина разницы между значениями $D_p(t)$ и $D_n(t)$ по уровню океана изменялась от одного сеанса измерений к другому как по величине, так и по знаку, по причинам, изложенным выше. Кроме того, детальный анализ результатов дальнометрирования показывает, что и в течение одного сеанса измерений имеется некоторый градиент величины этой разницы.

В других сеансах измерений, выполненных в режиме ориентации ОСКр, соответствие между результатами зондирования облачных полей и метеоданными примерно такое же, как и в рассмотренных выше. Следует также отметить, что ложные срабатывания в дальномерном канале при работе на теневой стороне Земли наблюдались на участках подспутниковой трассы, соответствующих прибрежной океанической поверхности, и при угле места Луны над горизонтом выше 30° и ее фазе более 0.9.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ

На рис. 4 представлены некоторые обработанные лидарные сигналы от различных отражающих поверхностей (облака, морская поверхность, суша). Рис. 4, а показывает отраженные сигналы, записанные в лидарном канале, рис. 4, б — в дальномерном. По оси абсцисс отложены расстояния в преде-

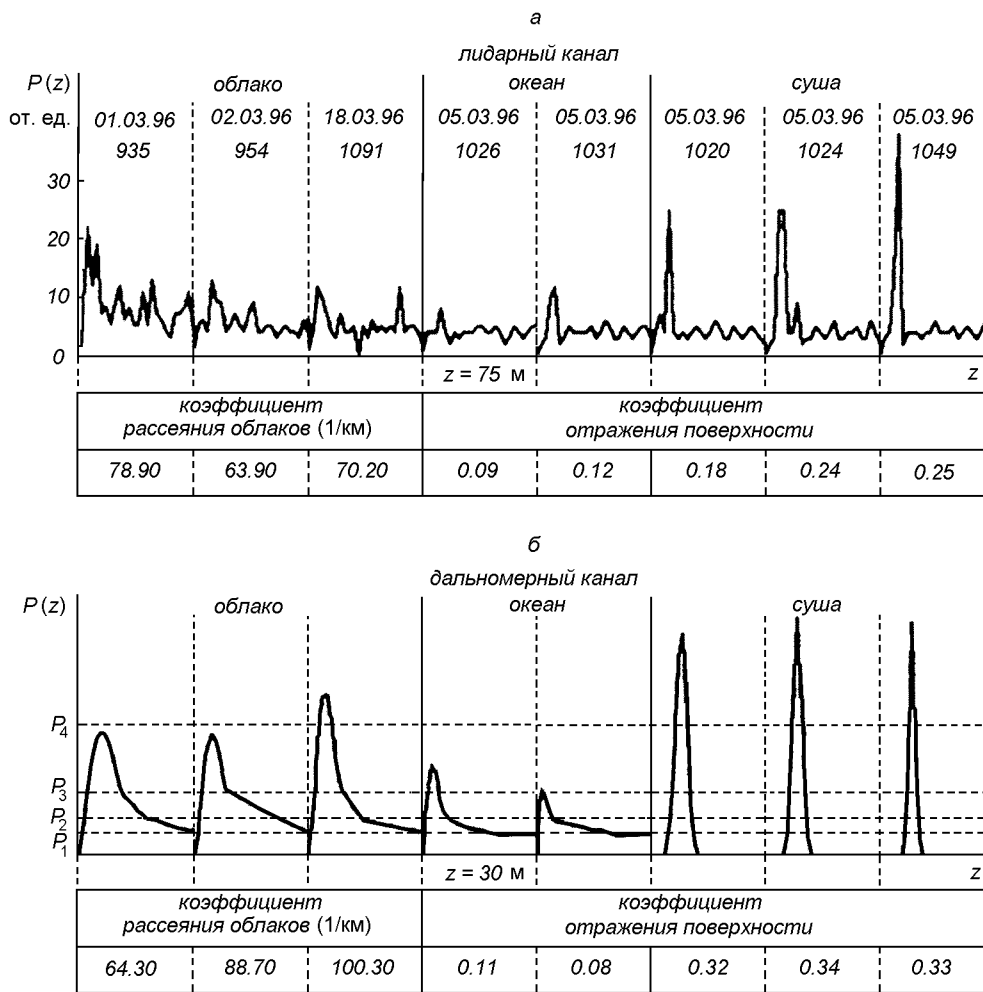


Рис. 4. Примеры некоторых экосигналов от различных рассеивающих объектов, реконструированных из данных лидарного (а) и дальномерного (б) каналов

лах отраженного сигнала, по оси ординат — амплитуда сигнала в относительных единицах. Для сигналов дальномерного канала показаны также четыре пороговых уровня $P_1 \div P_4$ [4].

Как видно из рис. 4, сигналы от облаков и Земной поверхности являются более интенсивными. Амплитуда сигналов от морской поверхности находится между уровнями второго и третьего порогов. Большинство лидарных сигналов из атмосферы получено от плотных облачных полей, что хорошо иллюстрируется значениями коэффициентов рассеяния, которые приведены на рисунке. Это обуславливает малое число отсчетов в лидарном сигнале, что и потребовало применения специальных алгоритмов обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первый российский лидар БАЛКАН, разработанный и изготовленный во второй половине 1980-х годов, после пятилетнего хранения был выведен в космос на модуле «Спектр». Лидар показал свою работоспособность при проведении с борта орбитальной станции «Мир» сеансов лазерного зондирования подстилающей поверхности Земли и облачных полей. Экспериментально определены рабочие характеристики лидара, которые в целом соответствуют расчетным. Вертикальное пространственное разрешение составляет 3 м, что является рекордным для существующих средств дистанционного космического зондирования. Использование даль-

номерного канала с погрешностью измерений 1.5 м позволяет более чем на порядок повысить точность определения высоты полета орбитальной станции по сравнению с существующими радиолокационными методами контроля высоты орбиты.

Отработаны методические вопросы, связанные с планированием и организацией сопровождения сеансов лазерного зондирования из ЦУПа. Накопленный в процессе их выполнения опыт позволит в дальнейшем правильно планировать проведение последующих экспериментов и сопутствующих подспутниковых измерений. Опыт создания лидара БАЛКАН и результаты проведенных экспериментов будут учтены при выполнении следующих проектов по лидарам серии БАЛКАН [3, 8].

Авторы весьма признательны космонавтам экспедиций ЭО-19, ЭО-20 и ЭО-21 за успешную работу с лидаром во время проведения сеансов лазерного зондирования, сотрудникам группы математического моделирования ЦУП за составление программ и проведение баллистических расчетов, в частности ведущему специалисту в этой области А. И. Манжелеву, а также всем службам ЦУП, участвовавшим в подготовке и проведении космических экспериментов с лидаром БАЛКАН.

1. Балин Ю. С., Тихомиров А. А. Лазерное зондирование Земли из космоса. II. Методологические основы лидарных измерений с борта орбитальной станции // Космич. наука і технологія.—1997.—3, № 1/2.—С. 26—33.
2. Балин Ю. С., Тихомиров А. А., Самойлова С. В. Предварительные результаты зондирования облаков и подстилающей поверхности Земли лидаром БАЛКАН // Оптика атмосферы и океана.—1997.—10, № 3.—С. 333—352.

рительные результаты зондирования облаков и подстилающей поверхности Земли лидаром БАЛКАН // Оптика атмосферы и океана.—1997.—10, № 3.—С. 333—352.

3. Зуев В. Е., Балин Ю. С., Зуев В. В. и др. Состояние и перспективы развития космических лидаров серии БАЛКАН // Оптика атмосферы и океана.—1995.—8, № 12.—С. 1718—1726.
4. Зуев В. Е., Балин Ю. С., Тихомиров А. А. и др. Лазерное зондирование Земли из космоса. I. Российский лидар космического базирования БАЛКАН // Космич. наука і технологія.—1997.—3, № 1/2.—С. 16—25.
5. Lidar Techniques for Remote Sensing // Proc. SPIE.—1994.—2310.—268 p.
6. Lidar Techniques for Remote Sensing II // Proc. SPIE.—1995.—2581.—256 p.
7. Lidar Techniques for Remote Sensing III // Proc. SPIE.—1996.—2956.—238 p.
8. Matvienko G. G., Zuev V. E., Shamanaev V. S., et al. Lidar BALKAN-2 for space platform ALMAZ-1B // Proc. SPIE.—1994.—2310.—P. 161—163.
9. Winker D. M., McCormick M. P. Observation of aerosol and clouds with LITE // Proc. SPIE.—1995.—2581.—P. 70—78.

REMOTE LASER SENSING OF THE EARTH FROM SPACE. III. SOME RESULTS OF THE SOUNDING OF THE EARTH SURFACE AND CLOUD FIELDS BY THE LIDAR BALKAN

Yu. S. Balin, S. V. Samoiloova, and A. A. Tikhomirov

Some preliminary results of laser sounding of the Earth surface (the ocean and the continent) and cloud fields obtained from the first Russian spaceborne lidar BALKAN in 1995 and 1996 are discussed in the paper. The measurements were made in various regions of the Earth under various light and shadow conditions for two orientation modes of the space station «Mir».