

Аэрозольный рамановский лидар «ЛОЗА-М2»

Ю.С.Балин, Г.С.Байрашин, Г.П.Коханенко, М.Г.Клемашева,
И.Э.Пеннер, С.В.Самойлова

Приведено описание сканирующего аэрозольного рамановского лидара «ЛОЗА-М2», осуществляющего зондирование атмосферы на длинах волн 532 и 1064 нм. Прием обратнорассеянного излучения происходит одновременно в двух режимах – аналоговом и счетно-фотонном. Кроме сигналов упругого рассеяния света на исходных длинах волн, регистрируется сигнал комбинационного рассеяния молекулярным азотом на длине волны 607 нм. Продемонстрирована возможность расширения высотного диапазона зондирования атмосферы от приземного слоя до стратосферы путем применения двух приемных телескопов – ближней и дальней зон, а также объединения аналоговых и счетно-фотонных лидарных сигналов в один обций. Приведены примеры натурных измерений аэрозольной стратификации атмосферы по вертикальным и горизонтальным трассам в период экспедиций в пустыню Гоби (Монголия) и в район озера Байкал.

Ключевые слова: лидар, упругое и комбинационное рассеяние, зондирование атмосферы.

1. Введение

В настоящее время в большинстве развитых стран мира при реализации национальных и международных научных программ по контролю оптического и термодинамического состояния атмосферы используются лидарные комплексы, расположенные как на территории государства, так и вне ее. В качестве примера приведем арктическую лидарную станцию США [1], лидары фирмы SIVATA сети станций NIES (Япония) в Китае, Корею и Монголии [2].

Более того, десять лет назад 19 европейских лидарных станций из 11 стран были объединены на общей методологической основе в Европейскую исследовательскую лидарную сеть для контроля пространственно-временного распределения аэрозольных полей атмосферы над территорией Европы [3]. В дальнейшем с аналогичными задачами по изучению трансграничного переноса аэрозольных примесей, связанных с песчаными бурями в пустынях Гоби и Такла-Макан, была создана Азиатская лидарная сеть [4], объединяющая научные группы из Китая, Японии и Кореи.

В русле развития этих интеграционных международных процессов в 2004 г. шестью научными организациями России, Белоруссии и Киргизии была создана лидарная сеть СНГ Cis-LiNet [5], простирающаяся от Минска до Владивостока.

Лидары всех этих сетей представляют собой крупные стационарные аппаратные комплексы, оснащенные различными типами лазерных передатчиков, фотоприемников и каналов регистрации многоволнового упругого и комбинационного рассеяния света. Как справедливо от-

мечено в [3], для организации совместной работы лидаров прежде всего необходимо провести их качественную взаимную калибровку, что весьма затруднительно, поскольку они удалены друг от друга на значительные расстояния.

Созданная для мониторинга тропосферного аэрозоля сеть микроимпульсных лидаров MPL-Net [6] эту задачу в полной мере не решает, поскольку контролирует оптические параметры атмосферы только на одной длине волны. В связи с этим весьма актуально создание небольших транспортабельных лидаров, которые по технологиям измерений соответствуют крупным комплексам, но позволяют оперативно проводить совместные измерения в различных регионах.

В 2008 г. в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева был разработан многоволновой малогабаритный аэрозольный рамановский лидар «ЛОЗА-М2», одной из основных задач которого также является проведение полевых экспедиционных исследований приземного и пограничного слоев, тропосферы и стратосферы в различных регионах. Описанию особенностей данного лидара, являющегося модификацией «ЛОЗА-MS» [7], и посвящена настоящая статья.

2. Конструкция и оптическая схема лидара

Внешний вид малогабаритного лидара «ЛОЗА-М2» показан на рис.1, а технические характеристики представлены ниже.

Лазер LS-2135

Энергия (мДж) на длинах волн:	
1064 нм	340
532 нм	170
Длительность импульса (нс)	10–12
Частота повторения импульсов (Гц)	10
Расходимость пучка (мрад)	2.5
Диаметр пучка (мм)	8

Ю.С.Балин, Г.С.Байрашин, Г.П.Коханенко, М.Г.Клемашева, И.Э.Пеннер, С.В.Самойлова. Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия, 634021 Томск, пл. акад. Зуева, 1; e-mail: balin@iao.ru

Поступила в редакцию 22 июня 2011 г.



Рис.1. Внешний вид приемопередатчика лидара «ЛОЗА-М2».

Оптическая приемная система

Диаметр основного телескопа (мм)	250
Фокусное расстояние (мм)	1000
Диаметр телескопа ближней зоны (мм)	50
Фокусное расстояние (мм)	200
Поле зрения телескопа (мрад)	1.5
Ширина полосы фильтров (нм)	2–4

Аналого-цифровой преобразователь Ла-н20-12USB

Число аналоговых входов	2
Максимальная частота дискретизации (МГц)	100
Входное сопротивление (Ом)	50
Диапазоны входного напряжения (В) . . ±2, ±1, ±0.4, ±0.2	
Разрешение (бит)	12

Счетчик импульсов PhCount-2USB

Число каналов	2
Скорость счета (МГц)	100
Пространственное разрешение (м)	1.5
Входное сопротивление (Ом)	50

Лидар «ЛОЗА-М2» предназначен для дистанционного зондирования атмосферы в полевых условиях, что накладывает повышенные требования на его конструкцию для сохранения оптических юстировок при длительных транспортировках, а также для защиты от влияния неблагоприятных погодных факторов. Поэтому все основные узлы приемопередатчика (лазер, телескопы, коллиматор и другие оптические элементы) крепятся по обеим сторонам единой платформы, вращающейся в креплении поворотного устройства. Платформа представляет собой объемно-профильную раму, что придает ей дополнительную жесткость. Внутри рамы равномерно распределены нагревательные элементы и вентиляторы, поддерживающие необходимую рабочую температуру приемопередатчика лидара независимо от внешних условий. Снаружи приемопередаточный блок закрывается термоизолирующим кожухом. Дополнительные бленды служат для устранения прямой солнечной засветки. Конструкция поворотного устройства позволяет закреплять приемопередаточный блок на платформе мобильных носителей в фиксированных положениях. Кроме того, предусмотрена возможность соединять его со сканирующей колонкой и получать про-

странственные разрезы аэрозольных полей как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях.

Общий принцип работы лидара достаточно традиционен. Импульсное излучение лазера на длинах волн 1064 и 532 нм посылается в атмосферу. Излучение, рассеянное атмосферой в обратном направлении, собирается зеркальными телескопами и регистрируется фотоприемниками с последующей оцифровкой сигналов, обработкой и визуализацией полученной информации аппаратно-программным комплексом на базе высокопроизводительного ноутбука с протоколом обмена внешнего интерфейса через USB-порты.

В то же время, по сравнению с большинством крупных стационарных лазерных комплексов, лидар «ЛОЗА-М2» обладает рядом технологических особенностей, обусловленных спецификой решаемых атмосферных задач: расширенным высотным диапазоном зондирования (от приземного слоя до стратосферы, 15–30 км) и необходимостью круглосуточного зондирования атмосферы. Подобные условия определяют требования к конструкции приемопередатчика лидара. Для решения этих задач разработаны и реализованы оригинальные схемные и методические решения. В оптической схеме приемопередатчика применяются два приемных телескопа – ближней и дальней зон – с выводом оптических сигналов от них попеременно на одни и те же фотоприемники. Что же касается самих сигналов, то они одновременно регистрируются в двух режимах – аналоговом и счетно-фотонном. Кроме упругого рассеяния на исходных длинах волн, в рассеянном излучении регистрируется линия (607 нм) комбинационного рассеяния (КР) молекулярным азотом. Поскольку она имеет на порядки меньшие сечения обратного рассеяния, используются фотоприемники, работающие в режиме счета фотонов. Кроме того, вводится дополнительный канал регистрации упругого рассеяния на длине волны 532 нм также в режиме счета фотонов, что позволяет при накоплении сигнала в два-три раза увеличить информационную дальность зондирования.

Оптическая схема лидара показана на рис.2. Передатчик лидара состоит из твердотельного Nd:YAG-лазера 1 (LS2135, фирма LOTIS-ТП, Белоруссия), излучающего по одной оси на длинах волн 1064 и 532 нм. Излучение расширяется ахроматическим трехлинзовым коллиматором 2, позволяющим уменьшить угол расходимости пучка до 0.5 мрад в диапазоне УФ и ИК областей спектра [8]. Основной приемный телескоп 3 системы Кассегрена (диаметр зеркала 250 мм, фокусное расстояние 1 м) используется для

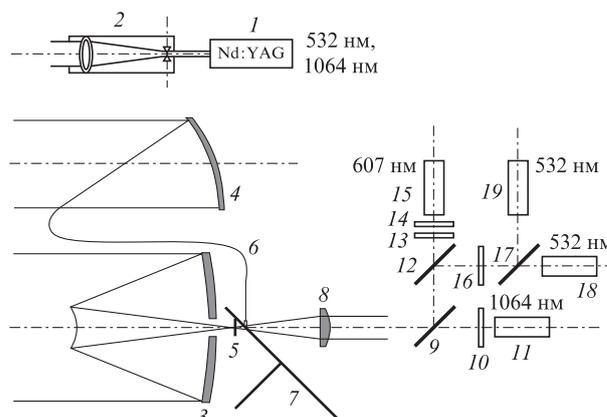


Рис.2. Оптическая схема лидара.

приема излучения из дальней зоны, а внеосевая парабола 4 (диаметр 50 мм, фокусное расстояние 200 мм) – из ближней зоны на расстояниях до 1.5 км. В фокусе основного телескопа установлена диафрагма 5, ограничивающая поле зрения до 1 мрад. Излучение от приемника ближней зоны подается в эту же точку с помощью световода 6. Зеркальный обтюратор 7 вращается с частотой 10 Гц, синхронизованной с частотой вспышек лазера, и позволяет поочередно подавать в фотоприемные каналы излучение, принятое обоими телескопами. Линза 8 формирует параллельный пучок диаметром 16 мм.

Разделение принятого излучения по длинам волн производится с помощью интерференционной оптики. Первое дихроичное зеркало 9 пропускает ИК излучение (1064 нм) и отражает излучение видимого диапазона. ИК излучение проходит через интерференционный фильтр (ИФ) 10 и принимается лавинным фотодиодом С30956Е-ТС 11 (PerkinElmer).

Дихроичное зеркало 12 пропускает излучение 607 нм, которое через ИФ 13 и полосовой фильтр 14, дополнительно обрезая излучение на $\lambda = 532$ нм, попадает на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) 15 типа Н7155Р-21 (Hamamatsu), работающий в режиме счета фотонов. Ослабление излучения возбуждающей линии с помощью обрезаящих фильтров в сумме с ИФ, установленными на каждом фотоприемнике, позволяет подавить возбуждающее излучение (532 нм) на каналах комбинационного рассеяния в 10^6 раз для 607 нм. Отраженное от зеркала 12 излучение на длине волны 532 нм проходит через ИФ 16 и делится стеклянной пластинкой 17 в соотношении 1:20 на два ФЭУ: ФЭУ-84 18, работающий в токовом режиме, и Н5783Р (Hamamatsu) 19, работающий в режиме счета фотонов.

Сигналы упругого рассеяния на $\lambda = 532$ нм регистрируются в токовом режиме фотомодулем ФМ-1 (разработка ИОА, Томск). Фотомодуль ФМ-1 для регистрации импульсных световых сигналов в условиях сильных фоновых засветок разработан на основе ФЭУ-84 и оригинального специализированного источника питания. Двухтактный преобразователь с независимым возбуждением, работающий на частоте 150 кГц, через трансформатор запитывает двухполупериодный многокаскадный умножитель напряжения, формирующий постоянное, независимое от фоновой засветки напряжение на динодах. Для исключения выхода ФЭУ из строя при большом среднем анодном токе на модулятор постоянно подается запирающее напряжение. Затвор (на основе оптореле) в момент поджига лампы лазера отпирает ФЭУ на время, которое подбирается в зависимости от требуемой дальности действия лидара. Фотомодуль требует внешнего питания 24 В. Существенный вариант распределения напряжения между динодами с помощью многокаскадного умножителя напряжения гарантирует постоянное напряжение на динодах при любых фоновых засветках и, следовательно, постоянный коэффициент умножения ФЭУ. При затемненном ФЭУ отсутствует потребление мощности в цепи питания, что позволяет отказаться от теплоотвода и уменьшает габариты источника питания. Испытания показали, что до засветок, соответствующих среднему анодному току 10 мА, коэффициент усиления ФЭУ неизменен в диапазоне трех порядков световой характеристики.

Оцифровка аналоговых сигналов производится 12-разрядными АЦП (ЛАН10-12USB-У, фирма Руднев–Шиляев) с пространственным разрешением от 1.5 м. Сигнал на

1064 нм регистрируется фотоприемным модулем ЛФД-30956-ТЕ (разработан ИФ НАНБ), в состав которого входит лавинный фотодиод С30956Е Perkin&Elmer с микрохолодильником и усилителем. Сигналы КР регистрируются фотоприемными модулями Н5783Р (Hamamatsu) с усилителями и счетчиком импульсов PhCount-2USB (разработка ИОА), позволяющим проводить счет фотонов с частотой до 100 МГц и пространственным разрешением 1.5 м. Для корректного сравнения сигналов комбинационного и упругого рассеяний часть (около 5%) излучения на 532 нм отводится в аналогичные счетные каналы. При частоте следования импульсов лазера 10 Гц и накоплении фотонов в течение 30 мин сигналы КР на молекулярном азоте в отсутствие облачности уверенно регистрируются до высоты тропопаузы. Следует отметить, что системы регистрации сигналов расположены непосредственно в корпусе приемопередатчика, и по линиям связи передается уже цифровая информация.

3. Натурные испытания лидара

В данном разделе в качестве примеров представлены отдельные лидарные измерения, осуществленные в период проведения комплексных экспедиций «Байкал» и «Монголия».

Вначале рассмотрим особенности формирования общего лидарного сигнала, полученного двумя приемными телескопами, а также аналоговых и счетно-фотонных сигналов. Использование приемных телескопов ближней и дальней зон позволяет охватить большой динамический диапазон изменения лидарных сигналов при зондировании атмосферы, тем самым реализуя максимально возможный охват контролируемого лидаром пространства.

На рис.3 показана геометрическая функция (форм-фактор) перекрытия диаграммы излучателя и полей зрения приемных телескопов ближней и дальней зон. Полный перехват обратного однократного рассеяния для телескопа ближней зоны начинается уже практически с 80 м, для основного телескопа дальней зоны – с 900 м. Поскольку площадь апертуры телескопа ближней зоны в 20 раз меньше, чем основного, то принимаемый им световой поток обратнорассеянного излучения, наиболее интенсивный при небольших дистанциях, не перегружает фотоприемники. Последние работают в линейном диапазоне световых характеристик для сигналов как из ближней, так и из дальней зон. При помощи аппаратно-программного

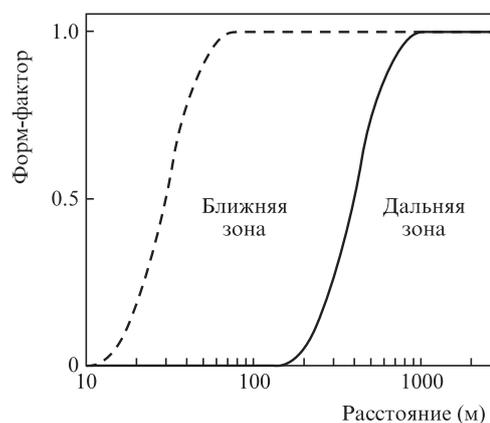


Рис.3. Форм-фактор лидара.

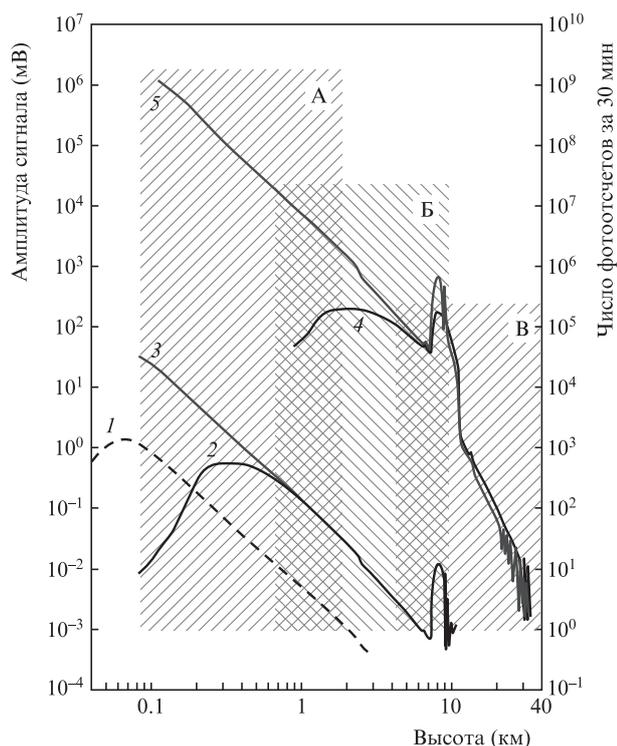


Рис.4. Реализации сигналов многоканальной приемной системы лидара «ЛОЗА-М2» на длине волны зондирования 532 нм. Левая шкала: 1 – аналоговый сигнал с ближней зоны; 2 – аналоговый сигнал с дальней зоны; 3 – восстановленный сигнал с аналоговых каналов. Правая шкала: 4 – счетно-фотонный сигнал с дальней зоны; 5 – восстановленный аналого-счетно-фотонный сигнал.

комплекса синхронизируются вспышки лазера и обтюратор переключается на световые потоки поочередно с телескопов ближней и дальней зон, а также выполняется раздельная запись сигналов с фотоприемников трех спектральных каналов (1064, 532 и 607 нм) в файлы данных от ближней и дальней зон. В процессе последующей предварительной обработки восстанавливается полный профиль принятых сигналов по всей трассе зондирования.

Проиллюстрируем эту методику на примере конкретной реализации в сеансе вертикального зондирования атмосферы в пустыне Гоби в июле 2008 г. (экспедиция «Монголия-08»). Сеанс проводился в темное время суток, и была возможность подключения фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов. На рис.4 показаны реализации сигналов для спектрального канала 532 нм: кривые 1, 2 (средние за установленный период накопления счета фотонов ~ 30 мин) с аналоговых фотоприемников приемных телескопов ближней и дальней зон соответственно, кривая 4 с фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов. Здесь же приведены (заштрихованные участки) диаграммы областей линейных диапазонов лидарных сигналов: А – для сигнала из ближней зоны (от 90 м в соответствии с форм-фактором (рис.3) до не более 2000 м при отношении сигнал/шум, превышающем 1); Б – для сигнала из дальней зоны (от 900 до ~ 12000 м) и В – для сигнала из дальней зоны, но с фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов. Для него линейный диапазон накопленного сигнала составляет от ~ 4 км до ~ 35 км. Нижний предел высотного диапазона для счетного канала определяется ограничениями скорости счета при интенсивном сигнале. На участках, где эти области перекрываются (на рис.4 они показаны двойной штриховкой), осу-

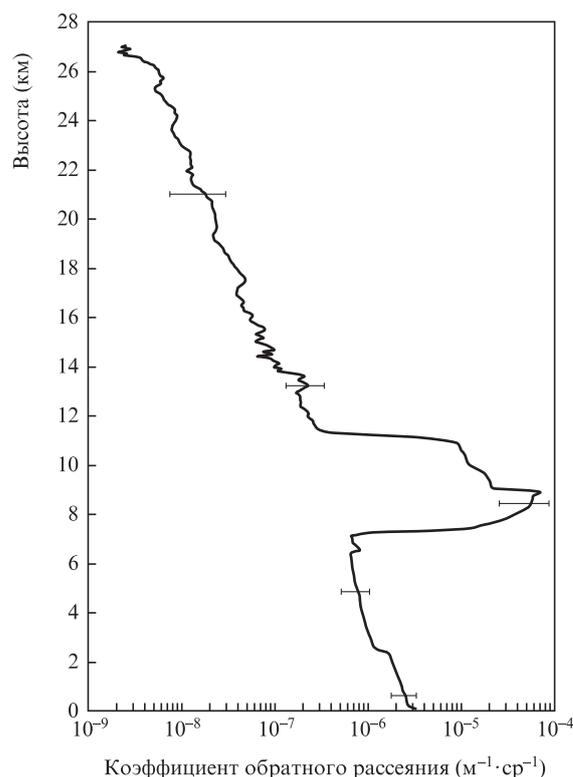


Рис.5. Профиль коэффициента аэрозольного обратного рассеяния, восстановленного из представленного на рис.4 лидарного сигнала.

ществляется амплитудная стыковка сигналов и методом наименьших квадратов определяется средний коэффициент пропорциональности между ними. Так, аналоговый сигнал из ближней зоны умножается на этот коэффициент и «сшивается» с сигналом из дальней зоны в области их перекрытия. Восстановленный таким образом сигнал с аналогового канала показан на рис.4 кривой 3. Аналогичным образом восстановленный сигнал с аналогового фотоприемника пересчитывается на число фотоотсчетов и «сшивается» с сигналом фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов (кривая 5).

Таким образом, принятые сигналы могут быть восстановлены по вертикальной трассе зондирования (0.1–30 км) в динамическом диапазоне до девяти-десяти порядков, тогда как линейность световой характеристики отдельных фотоприемников имеет ограниченный динамический диапазон, обычно не превышающий трех порядков. На рис.5 представлен непрерывный профиль коэффициента обратного рассеяния, восстановленный из рассмотренной реализации сигналов по методикам, применяемым нами для аэрозольных рамановских лидаров данного типа [9]. Погрешности измерений коэффициента обратного рассеяния указаны горизонтальными черточками. На профиле выявлены характерные аэрозольные слои стратификации атмосферы от приземного слоя (~ 100 м) до нижних слоев стратосферы (~ 25 км). Это и выраженный пограничный слой до высоты 2.5 км, и тонкий подоблачный слой на высоте 6.5 км, и, несмотря на присутствие многослойной облачности верхнего яруса на высотах от 7 до 11 км с оптической толщиной, достигающей до единицы, четко проявляющиеся аэрозольные слои на высотах 13–14 км. Последние, как отмечалось в работе [10], являются следами аэрозольного возмущения нижней стратосферы продуктами извержения вулкана Ожмок.



Рис.6. Зондирование атмосферы лидаром «ЛОЗА-М2» над оз.Байкал на стационаре «Боярск» ОФП БНЦ СО РАН.

В качестве примера зондирования атмосферы по горизонтальным трассам над ровной подстилающей поверхностью представим лидарные данные, полученные нами в акватории оз. Байкал в период экспедиции «Байкал-08». Зондирование проводилось по горизонтальной трассе, пролегающей поперек оз. Байкал (рис.6) – от полигона БНЦ СО РАН в пос. Боярск (где находился лидар) до противоположного берега в районе Б. Голоустное. На рис.7,б показан «сшитый» из ближней и дальней зон сигнал с фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов в спектральном канале для длины волны 532 нм. В конечной точке трассы, удаленной на 52 км, отчетливо проявляется пик отражения сигнала от горного хребта противоположного берега. На рис.7,а изображен восстановленный из данного сглаженного сигнала профиль коэффициента

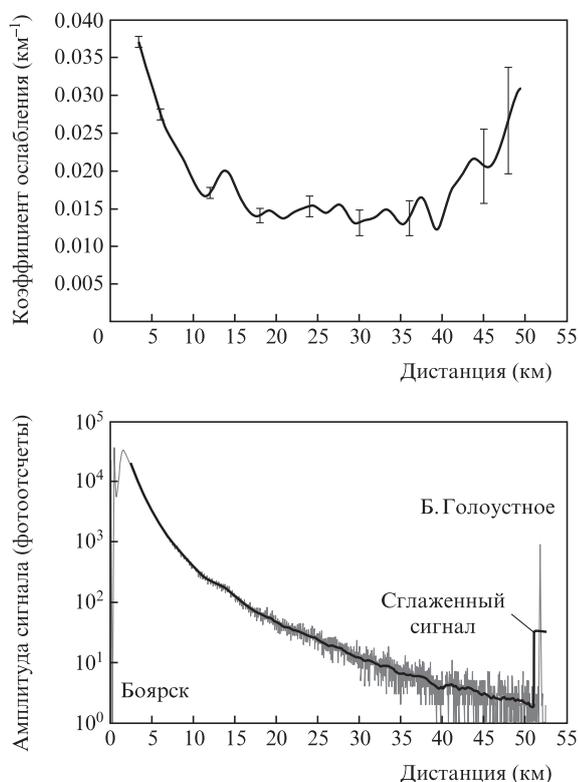


Рис.7. Профиль коэффициента ослабления (а) и счетно-фотонный сигнал (б, число фотоотсчетов за 25 мин) по данным зондирования на горизонтальной трассе над оз. Байкал.

аэрозольного ослабления с приведенными среднеквадратичными отклонениями. Хорошо видны повышенное заполнение аэрозолями на удалениях от обоих берегов до 10 км и волнистая структура распределения слоев над зеркалом оз. Байкал. Подобная пространственная структура была уже выявлена нами ранее в ходе проведения лидарных корабельных исследований аэрозольных полей в атмосфере оз. Байкал [11], но тогда получение одного поперечного разреза занимало несколько часов. В данном сеансе зондирования разрез был получен за время накопления сигнала ~25 мин.

4. Заключение

Разработан малогабаритный экспедиционный аэрозольный рамановский лидар «ЛОЗА-М2», позволяющий в одном цикле измерений контролировать оптическое состояние атмосферы от приземного слоя до стратосферы. Подобный динамический диапазон достигается за счет использования приемных телескопов ближней и дальней зон, а также аналогового и счетно-фотонного режимов регистрации лидарных сигналов.

Эффективность работы лидара «ЛОЗА-М2» доказана при проведении различных российских и международных экспедиций. Малогабаритный аэрозольный рамановский лидар «ЛОЗА-М2» в 2009 г. на Международной выставке «Фотоника-09» удостоен диплома лауреата конкурса «Лазерной ассоциации России» как одна из лучших отечественных разработок в области лазерного приборостроения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-08-00347-а), проекта Президиума РАН № 4.13, Минобрнауки РФ (госконтракты № 14.740.11.0204, 02.740.11.0674 и 16.518.11.7067).

- Razenvov I.A., Eloranta E.W., Hedrick J.P., Holz R.E., Kuehn R.E., Garcia J.P. *Proc. 21st Int. Laser Radar Conf. (ILRC21)* (Quebec, Canada, 2002, p.57).
- <http://www.sibata.co.jp>
- Bösenberg J., Ansmann A., Baldasano J., Balis D., Böckmann C., Calpini B., Chaikovskiy A., Flamant P., Hagard A., Mitev V., Papayannis A., Pelon J., Resendes D., Schneider J., Spinelli N., Trickle T., Vaughan G., Visconti G., Wiegner M. *Advances in Laser Remote Sensing: Selected Papers 20th Int. Laser Radar Conf. (ILRC)* (Vichi, France, 2000, p.155).
- Murayama T., Sugimoto N., Matsui I., Lio Zh., Sakai T., Shibata T., Iwasaka Y., Won J.G., Yoon S.C., Li T., Zhou J., Hu H. *Advances in Laser Remote Sensing: Selected Papers 20th Int. Laser Radar Conf. (ILRC)* (Vichi, France, 2000, p.169).
- Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С., Ельников А., Тулинов Г.Ф., Плюснин И.И., Букин О.А., Чен Б.Б. *Оптика атмосферы и океана*, **18**, 1066 (2005).
- Welton E.J., Campbell J.R., Berkoff T.A., Spinhome J.D., Tsay S.Ch., Holben B., Shiobara M. *Proc. 21st Int. Laser Radar Conf. (ILRC21)* (Quebec, Canada, 2002, p.285).
- Vairashin G.S., Balin Yu.S., Ershov A.D., Kokhanenko G.P., Penner I.E. *Opt. Eng.*, **44** (7), 071209-1 (2005).
- Коханенко Г.П., Макогон М.М., Пономарев Ю.Н., Рышков О.А., Симонова Г.В. Патент № 2009129019/22(040351) (2009).
- Самойлова С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э. *Оптика атмосферы и океана*, **22**, 344 (2009).
- Зуев В.В., Балин Ю.С., Букин О.А., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Кабашников В.П., Невзоров А.В., Осипенко Ф.П., Павлов А.Н., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Столярчук С.Ю., Чайковский А.П., Шмирко К.А. *Оптика атмосферы и океана*, **22**, 450 (2009).
- Балин Ю.С., Ершов А.Д., Пеннер И.Э. *Оптика атмосферы и океана*, **16**, 587 (2003).