

# ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА АТМОСФЕРЫ

**Н**ебо над нами не так уж прозрачно, даже в отсутствие облаков. Молекулы и атомы воздуха находятся в хаотическом, тепловом движении. А ветер переносит более тяжелые частички. Диагностируя структуру аэрозольных полей в тропосфере, можно многое узнать о загрязнениях на высоте десятков километров.

Мониторинг оптического состояния атмосферы – важная область климатологических исследований. Необходимо получить достоверные данные о пространственно-временной трансформации атмосферных компонентов. Для этого создают глобальные измерительные сети международного и регионального уровня. Основные задачи сетей – координация регулярно проводимых измерений и формирование баз данных. Лидары предназначены для мониторинга высотного распределения компонентов атмосферы. Прибор назван по аббревиатуре английских слов Light Detection and Ranging. Растущее внимание мировой общественности к проблемам глобальной экологии дали толчок к стремительному развитию лидарных технологий.

Лидары для исследования озона и аэрозоля в стратосфере составляют основу сети NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change) [1]. Для мониторинга тропосферного аэрозоля создана сеть микроимпульсных лидаров MPL-Net (Micro-pulse lidar Network) [2]. Она координирует свою работу с AERONET. В 2000 году основана Европейская аэрозольная лидарная сеть EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network) [3]. EARLINET обеспечивает координированную работу более 20 лидарных станций от Уэльса до Беларуси с целью исследования процессов крупномасштабного переноса аэрозоля в Европейском регионе. Лидарные исследования выноса азиатской пыли в регионы Тихого океана выполняются в AD-Net (Asian Dust Network) [4].

В 2004 году была создана международная рабочая группа специалистов, представляющих региональные лидарные

сети EARLINET, AD-Net, REALM, AliNe, MPL-Net и CIS-LiNet, задача которой состояла в координации работы региональных лидарных сетей и подготовке плана формирования глобальной лидарной сети (GALION – GAW Aerosol Lidar Observation Network). Такой план (GAW Report No. 178) был создан в 2007 году и утвержден Всемирной метеорологической организацией в 2009 году.

В 2004 г. в результате совместной деятельности научных организаций Беларуси, России и Киргизии, в сотрудничестве с измерительными сетями EARLINET, AD-Net и AERONET, при поддержке Международного научно-технического центра (МНТЦ) была создана лидарная сеть для контроля параметров атмосферного аэрозоля и озона в регионах СНГ [5]. Основной целью формирования CIS-LiNet является проведение совместно с другими международными измерительными сетями координированных наблюдений параметров атмосферы на пространстве Евразийского континента.

Технические требования к лидарным системам CIS-LiNet предусматривают зондирование тропосферного аэрозоля на трех длинах волн (355, 532 и 1064 нм) и наличие канала регистрации комбинационного рассеяния азотом на длине волны 387 или 607 нм. На некоторых станциях измеряют деполаризацию рассеянного излучения.

Параметры, исследуемые на станциях CIS-LiNet, определены на основе опыта работы EARLINET. Эти параметры обеспечивают измерения оптических характеристик аэрозольного слоя, и определяют микроструктуру аэрозольных частиц. К оптиче-

ким характеристикам слоев относятся показатели ослабления и обратного рассеяния аэрозоля. Определяя величину сигнала обратного рассеяния, получают физические характеристики атмосферы. Мобильные лидары в CIS-LiNet предназначены не только для проведения исследовательских работ, но и для реализации программы интеркалибровки лидарной аппаратуры. Один из таких лидаров был создан в последние годы в Институте оптики атмосферы СО РАН.

Малогобаритный аэрозольно-рамановский лидар ЛОЗА-М2 работает на частотах упругого и комбинационного рассеяния света. Он предназначен для контроля оптического состояния тропосферы и стратосферы до высот 20 км с пространственным разрешением 3–15 м. Области применения разработанного лидара охватывают как фундаментальные исследования по оптике атмосферы, так и многие прикладные задачи. В задачах климатологии лидар используется для оперативной оценки оптического состояния атмосферы, в том числе для валидации различных оптических спутниковых систем. В задачах экологического контроля лидар может применяться для оценки интенсивности выбросов локальных источников загрязнений и картирования их аэрозольных шлейфов над городом. Функционально лидар состоит из приемо-передат-

чика и системы управления, регистрации сигналов и обработки информации. Для регистрации лидарных сигналов реализовано два режима: аналого-цифровое преобразование и режим счета фотонов. Приемная система оснащена двумя оптическими системами ближней и дальней зоны, что позволяет одновременно получать информацию о структуре атмосферы в диапазоне 0,05–40 км, охватывая приземный и пограничный слой, тропосферу и стратосферу.

В лидаре ЛОЗА-М2 (ИОА СО РАН) полностью реализована схема одновременного наблюдения лидарных сигналов упругого и комбинационного рассеяния при облучении среды на лазерных длинах волн 1064 и 532 нм. Лидар сконструирован на основе лазера LOTIS 2134 на Nd:YAG и приемного зеркального телескопа системы Кассегрена диаметром 230 мм. Оптическая схема лидара представлена на рис.1. Основные параметры лидара: энергия излучения на длинах волн 1064 нм – 230 мДж, 532 нм – 150 мДж. Диаметр зондирующего пучка 50 мм, расходимость 0,5 мрад. Поле зрения приемника 1 мрад. Кроме эхо-сигналов упругого рассеяния, лидар регистрирует сигналы комбинационного рассеяния (КР) на молекулярном азоте (607 нм). Расстояние от основного зеркала до излучателя (база лидара) составляет 0,3 м. При

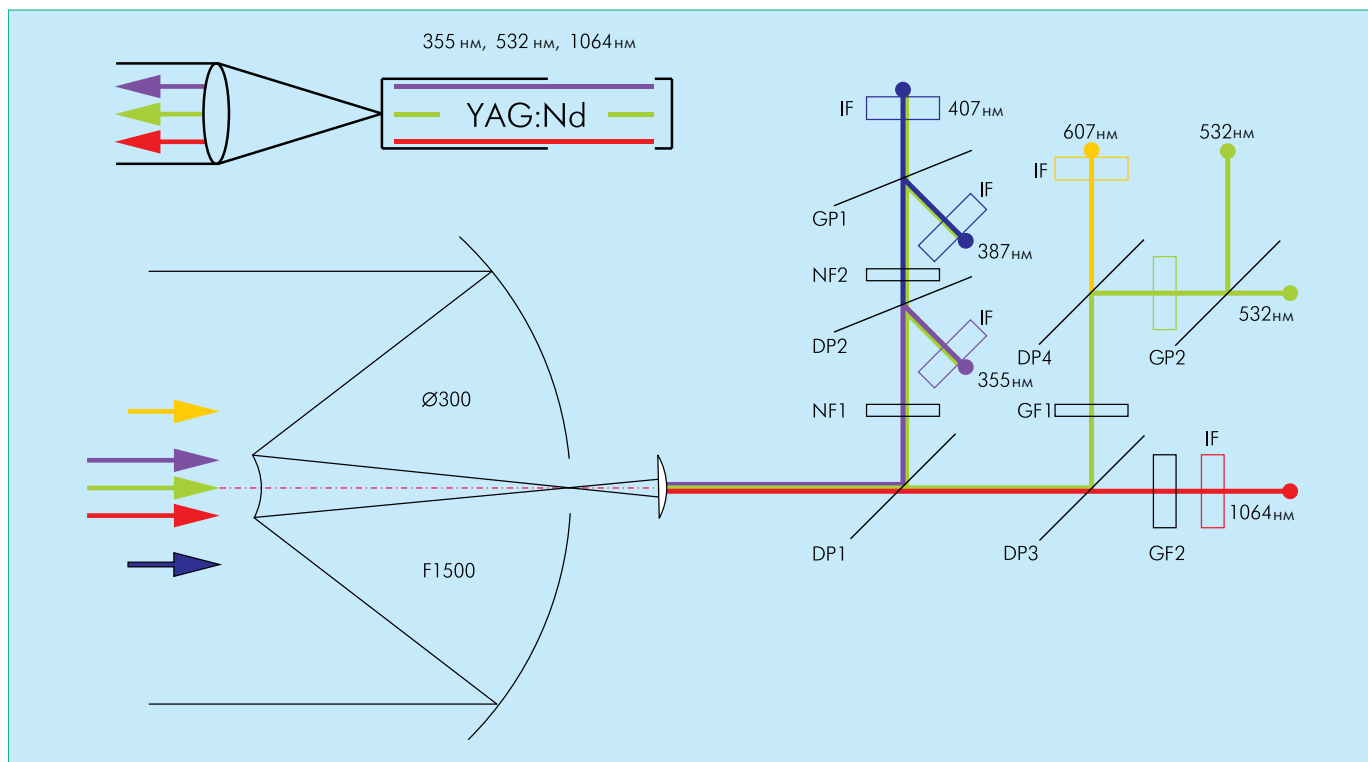


Рис.1 Оптическая схема лидара ЛОЗА-М2:

DP1 – дихроичная пластинка, отражение 355, 387 и 407 нм на уровне 98%; NF1 – фильтр, обрезаящий излучение 532 нм (<0,01%); DP2 – дихроичная пластинка, отражение излучения 355 нм (99%); NF2 – фильтр, обрезаящий излучение 355 нм (<0,02%); GP1 – стеклянная пластина, отделение 4% излучения 387 нм; DP3 – дихроичная пластинка, отражение излучения 532 и 607 нм (98%); GF1 – стеклянный фильтр ЖС11 для подавления излучения 355 нм (<0,01%); DP4 – дихроичная пластинка, отражение излучения 532 нм; GP2 – стеклянная пластина, отделение 4% излучения 532 нм на счетный канал; GF2 – стеклянный фильтр КС15 для подавления излучения 355 и 532 нм; IF – узкополосные интерференционные фильтры



**Рис. 2** Лидар ЛОЗА-М2: а) полевые испытания на стационаре Бурятского научного центра СО РАН, п.Боярск; б) внешний вид приемных телескопов ближней и дальней зон лидара

выбранных базе и поле зрения лидара рабочая зона лидара начинается с расстояния 100 м, что позволяет устранить сигнал от ближней зоны, выходящий за рамки динамического диапазона фотоприемников. Кроме указанного на схеме зеркала, вблизи излучателя (база 20 см) установлен второй приемный телескоп с объективом диаметром 70 мм для приема сигналов из ближней зоны (70 м). Прибор прошёл полевые испытания (рис.2а.). Внешний вид приемных телескопов лидара приведен на рис.2б.

Система спектрального разделения принимаемых сигналов основана на последовательном расщеплении пучка с помощью дихроичных пластинок (DP). Ослабление излучения возбуждающей линии с помощью обрезывающих (NF) фильтров в сумме с интерференционными светофильтрами, установленными на каждом фотоприемнике, позволяет осуществить подавление возбуждающего излучения (532 нм) на каналах комбинационного рассеяния на уровне  $10^{-6}$  для  $\lambda=607$  нм, и на уровне  $10^{-7}$  для канала  $\lambda=1064$  нм.

Сигналы упругого рассеяния на  $\lambda=532$  нм регистрируются в токовом режиме ФЭУ-84, фотоэлектронными умножителями с оригинальными (разработка ИОА) блоками питания. Они позволяют устранить влияние фоновых солнечных засветок на чувствительность ФЭУ. Оцифровка сигнала производится 12-разрядными АЦП (ЛА10-12USB-У фирмы «Руднев-Шилияев»)

с пространственным разрешением от 3 м. Сигнал на 1064 нм регистрируется фотоприемным модулем ЛФД-30956-ТЕ разработки ИФ НАНБ, в состав которого входит лавинный фотодиод С30956Е Perkin&Elmer с микрохолодильником и 14-разрядный АЦП. Сигналы комбинационного рассеяния регистрируются фотоприемными модулями Н5783Р (Hamamatsu), с усилителями разработки ИОА и счетной платой PMS-300 (Becker & Hickl). Плата позволяет вести подсчет фотонов до частоты 200 МГц с пространственным разрешением 37,5 м. Для корректного сравнения сигналов комбинационного и упругого рассеяния часть (около 5%) излучения на  $\lambda = 532$  нм отводится в аналогичные счетные каналы. При частоте повторения импульсов лазера 10 Гц и накоплении фотонов в течение 30 минут сигналы КР на молекулярном азоте в отсутствие облачности уверенно регистрируются до высоты тропопаузы. Лидарные сигналы КР водяным паром на длине волны 407 нм, показывают возможность регистрации водяного пара до высот 2–4 км в зависимости от синоптических условий.

Основное эксплуатационное достоинство лидара – это комплексное сочетание различных технических и методических подходов. Применение различных режимов регистрации сигналов повышает потолок зондирования как минимум в 3–4 раза по сравнению только с аналоговым режимом и позволяет эксплуатировать лидар в любое время суток. Преимущество разработанного оборудования перед существующими зарубежными аналогами заключается в следующем.

- Лидар позволяет одновременно регистрировать сигналы в аналоговом и счетно-фотонном режимах. Это значительно расширяет диапазон, начиная от приземного слоя до тропосферы.
- Наличие двух приемников, ближней и дальней зон, позволяет синхронно исследовать динамические ситуации по формированию аэрозольных полей в пограничном



**Рис. 3** Коллектив международной экспедиции «МОНГОЛИЯ-08» с лидаром ЛОЗА-М2 ( Монголия, п. Сайншанд )

слое и тропосфере. Приемники с помощью оригинальной оптической системы работают одновременно при одной посылке лазерного излучения.

- Наличие оригинального аналогового фотомодуля, разработанного ИОА СО РАН, позволяет исследовать параметры атмосферы в условиях интенсивных солнечных помех. При этом чувствительность лидара не меняется.
- Компактные размеры позволяют использовать лидар в комплексных полевых экспедициях, оперативно доставляя лидар в пункт измерений.
- Совместное использование эффектов упругого и неупругого рассеяния в лидарной технологии улучшает качество получаемой атмосферной оптической информации. Погрешность измерений уменьшается в 2–3 раза. А по результатам многоволнового зондирования оценивают спектр размеров аэрозольных частиц.

Лидар ЛОЗА-М2 изготовлен в 2007 году в виде лабораторного макета. В 2008 году он прошёл полевые испытания на побережье озера Байкал (рис.2а.). В том же году в период проведения международной экспедиции «Монголия-08» он участвовал в комплексных исследованиях тропосферы. Перед экспедицией стояла задача изучения песчаных бурь пустыни Гоби (рис.3). Прибор в 2008 году вошел в перечень достижений СО РАН. В 2009 году малогабаритный аэрозольно-рамановский лидар ЛОЗА-М2 на Международной выставке «Фотоника-09» удостоен диплома лауреата конкурса Лазерной ассоциации России, как одна из лучших отечественных разработок в области лазерного приборостроения. Сейчас лидар ЛОЗА-М2 передан в Бурятский научный центр СО РАН для дальнейшей эксплуатации.

Автор выражает искреннюю благодарность своим коллегам Г. Байрашину, Г. Коханенко, И. Пеннер и С.Самойловой за помощь в проведении работы и обсуждении результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **NDSC.** Network for the Detection of Stratospheric Change. 2001. ([www.ndsc.ncep.noaa.gov/NDSCbrochure.pdf](http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/NDSCbrochure.pdf)).
2. **Welton E.J., Campbell J.R., Berkoff T.A et al.** The Micro-pulse Lidar Network (MPL-Net) – Lidar Remote Sensing in Atmospheric and Earth Sciences: Reviewed and revised papers at the twenty-first Int. Laser Radar Conference (ILRC21). Part I. Quebec. Canada. 8–12 July 2002.
3. **Bosenberg J., Ansmann A., Baldasano J., et al.** EARLINET-A European aerosol research lidar network. – Advances in Laser Remote sensing: Selected papers 20-th Int. Laser Radar Conference (ILRC). Vichi. France. 2000.
4. **Murayama T., Sugimoto N., Matsui I. et al.** Lidar Network observation of Asian dust. – Advances in Laser Remote sensing: Selected papers 20-th Int. Laser Radar Conference (ILRC). Vichi. France. 2000.
5. **Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С. и др.** Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура. – Оптика атмосферы и океана, 2005, том 18, № 12.