

И.В. Самохвалов<sup>1</sup>, С.М. Бобровников<sup>2</sup>, П.П. Гейко<sup>3</sup>,  
А.В. Ельников<sup>2</sup>, Б.В. Кауль<sup>2</sup>

## Развитие высотного лидара Томского государственного университета как уникального комплекса для мониторинга атмосферы

<sup>1</sup> Томский государственный университет

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы СО РАН,

<sup>3</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 1.08.2006 г.

Изложена концепция развития высотного лидара Томского государственного университета как уникального комплекса для мониторинга атмосферы, на базе которого создается учебно-научный центр. Основные усилия сосредоточены на модернизации и совершенствовании технических характеристик лидара и расширении круга решаемых с его помощью задач.

### Введение

К настоящему времени высотный поляризационный лидар Томского государственного университета, разработанный совместно с Институтом оптики атмосферы СО РАН, зарекомендовал себя как уникальный экспериментальный комплекс для лазерного мониторинга атмосферы. На нем проводились и проводятся уникальные исследования по измерению высотных профилей всех элементов матрицы обратного рассеяния света атмосферного аэрозоля, включая облачный аэрозоль. Лидар внесен в «Перечень уникальных экспериментальных установок национальной значимости» [1], информация о нем содержится в международном каталоге, изданном в США [2], тем самым он включен в мировую сеть станций лазерного зондирования атмосферы. Но как базовый элемент для атмосферных исследований он далеко не исчерпал все свои возможности.

Оснащение лидара современными оптико-электронными системами, включающими: передатчик лазерного излучения с повышенными энергетическими характеристиками, поляризационные оптические элементы, более узкополосные спектральные (селектирующие) элементы, блок регистрации лидарного сигнала на основе высокочувствительной ПЗС-матрицы, а также введение в приемный канал спектроанализатора позволят не только увеличить пространственно-временные параметры лидара и тем самым обеспечить более высокий уровень реализации программы уже осуществляющихся исследований кристаллических облаков [3, 4], но и значительно расширить круг решаемых задач, превратив его в универсальный аэрозольно-газовый лидар.

Лазерный метод зондирования относится к дистанционным, бесконтактным и оперативным методам. Функциональная взаимосвязь между атмосферными и аппаратурными параметрами определяется лидарным уравнением, которое достаточно подробно представлено в ряде монографий, например [5, 6]. Определяющим элементом реализации потенциальных возможностей лазерного (лидарного) зондирования являются характеристики источника когерентного оптического излучения (лазера).

### Источник лазерного излучения

В настоящее время поляризационный лидар Томского госуниверситета оснащен лазером ИЛТИ-405. Его параметры в сравнении с параметрами приобретаемых в 2006 г. лазеров фирм Quantel и LOTIS, предназначенных для модернизации данного лидара, приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, энергия новых лазеров на длине волны  $\lambda = 532$  нм, которая наиболее широко используется в практике лидарного зондирования, в первом случае в 19 раз, а во втором в 10 раз превосходит энергию лазера, имеющегося на данный момент. Поэтому при временном накоплении лидарного сигнала  $N(H)$  с одними и теми же случайными ошибками при одном и том же количестве лазерных импульсов с лазером фирмы Quantel потребуется в 19 раз, а с лазером LOTIS в 5 раз меньше времени, чем с лазером ИЛТИ-405 при его «крейсерской» частоте посылок лазерных импульсов 20 Гц. Кроме того, излучение энергии за более короткие промежутки времени (импульс излучения для приобретаемых лазеров 8 и 6–7 нс, а для имеющегося

14 нс) приводит к улучшению отношения «сигнал-шум» и соответственно увеличению высотного диапазона зондирования. При этом о реализации каких-либо натуральных экспериментов в атмосфере на преобразованных частотах не могло быть и речи из малой исходной энергии лазера ИЛТИ-405.

Таблица 1  
Параметры лазерных излучателей

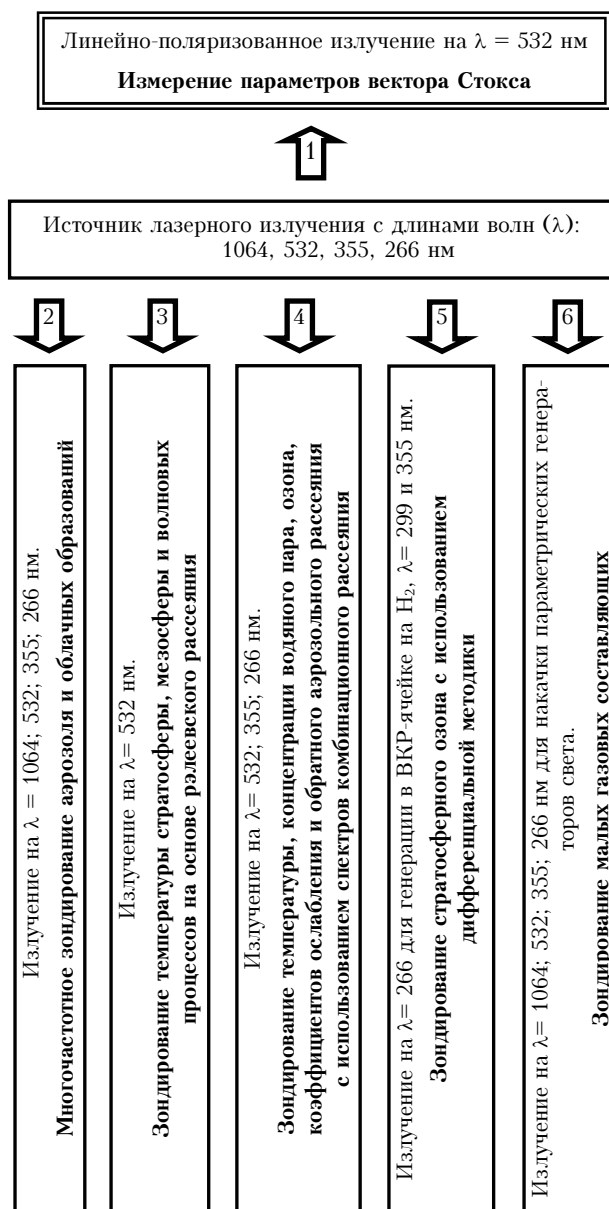
Лазер	Quantel YG981E-20	LOTIS LS-2137U	ИЛТИ-405
Длина волны, нм	Энергия, мДж		
1064	1600	700	—
532	780	400	40
355	420	160	—
266	120	120	—
Частота импульсов, Гц	20	10	12,5–25,0
Расходимость пучка, мрад	<0,5	0,8	3,5
Длительность импульса (1064 нм), нс	8	6–7	14

Энергетические параметры импульсов генерации, представленные в табл. 1, соответствуют режиму работы лазеров на какой-то одной частоте. Но оба вводимых в эксплуатацию лазера снабжены встроенными блоками генерации частот на базе основной частоты ( $\lambda = 1064$  нм). В результате на выходе лазера имеется излучение на четырех длинах волн: 1064, 532, 355 и 266 нм. Эффективность преобразования частоты составляет десятки процентов, и энергия импульсов гармоник существенно меньше значений, представленных в табл. 1, но и ее достаточно для решения многих задач лазерного зондирования.

### Спектр задач лазерного зондирования, вытекающий из модернизации лидара

Весь спектр потенциально возможных измерений и исследований атмосферных параметров и компонент с использованием имеющихся длин волн приведен в виде блок-схемы на рисунке. При этом в решении каждой из представленных на блок-схеме проблем, на уровне демонстрации потенциальных аппаратурно-методических возможностей, как минимум один из авторов данной статьи принимал участие. В верхней части блок-схемы (направление 1) представлен уже зарекомендовавший себя в ночных измерениях блок лидара для исследования параметров вектора Стокса. Увеличение энергетического потенциала источника лазерного излучения повысит точность подобных измерений и уменьшит время их накопления и при более тщательной спектральной селекции (в настоящее время полуширина интерференционного фильтра 2,5 нм) переведет измерения в режим светлого вре-

мени суток. В нижней части блок-схемы даны перспективные направления исследований, возникающие в результате наличия многочастотного лазерного передатчика, имеющего запас энергии и позволяющего получать необходимые для решения конкретных задач частоты излучения.



Блок-схема комплекса аэрозольно-газовых измерений, проводимых на лидаре Томского государственного университета

### Методики, обеспечивающие решение задач

Решения обратных некорректных задач оптики атмосферы на основе лидарных данных, в том числе и многочастотного зондирования аэрозоля (направление 2) подробно изложены в монографии

[7]. Однако из-за отсутствия в первую очередь мощных лазерных передатчиков имеются только единичные публикации по реализации данной теории применительно к натурным экспериментам [8, 9].

Дистанционное определение температуры с помощью лазера на основе явления рэлеевского рассеяния в стратосфере, мезосфере и исследование характеристик внутренних гравитационных волн (направление 3) давно уже получили признание в мировом сообществе (см., например, [10, 11]). Подобные, но единичные измерения, отражающие специфику над регионом Западной Сибири, проводились и Томске [12].

Теоретические основы использования комбинационного рассеяния для многокомпонентного анализа (направление 4) заложены еще в работе [5] и получили практическое развитие в работах [13–15].

Наиболее распространенные в последнее 20-летие измерения стратосферного озона с использованием метода дифференциального поглощения (направление 5) основаны на излучении ХеСI-эксимерного лазера с длиной волны 308 нм (основная длина волны – излучение, поглощаемое озоном), ее дальнейшем преобразовании в ВКР-ячейке с Н<sub>2</sub> в 353 нм (референтная длина волны – непоглощаемая озоном) и анализом ослабления на этих длинах волн [16, 17]. Использование в качестве основной длины волны 299 нм, которая является производной от 266 нм (см. рисунок) и поглощение озона на которой в 4 раза больше, чем на 308 нм,

позволит более контрастно выявить эффект дифференциального поглощения.

Интенсивное развитие метода дифференциального поглощения в плане расширения спектра измерений концентрации малых газовых составляющих атмосферы связано с направлением 6, в котором используются параметрические генераторы света (ПГС) [18–20]. В табл. 2 приведены параметры некоторых вариантов плавно перестраиваемых по частоте в широком спектральном интервале узкополосных ПГС, дающих дополнительные возможности в реализации лидаров-газоанализаторов и имеющих в коммерческой продаже. Их особенностью является возможность плавной перестройки лазерного излучения с узкой спектральной шириной линии в обширной области спектра, в основном подходящей на более перспективный для дневных измерений ИК-диапазон (см. табл. 2). Например, ПГС с накачкой третьей гармоникой Nd:YAG-лазера перекрывает диапазон 416–487 и 1306–2,411 нм при общей эффективности 35%. Рассматриваемый лидар укомплектовывается ПГС LT-2215 фирмы LOTIS (последняя строка в табл. 2).

Конструктивное решение формирования единого передатчика лазерного излучения в необходимых диапазонных длин волн и адаптация всех рассмотренных выше методик под характеристики приемно-передатчика поляризационного лидара Томского государственного университета являются еще одним аспектом его модернизации и развития.

Таблица 2

Параметры коммерческих ПГС, излучающих в УФ-, видимой, ближней ИК-области спектра

Модель	Фирма, страна	Диапазон перестройки, нм	Энергия, мДж	Частота повторения, Гц	Длительность импульсов, нс	Способ накачки	Ширина линии	Расходимость, мрад	Примечание
МОРО-HF	Spectra-Physics, USA	440... 1800	75	10	4...6	YAG:Nd	0,075 см <sup>-1</sup>	–	ПГС с автослежением
Scan Linc-S	Lambda Physics Inc., USA	420...2500	150	1000	7	YAG:Nd с диодной накачкой	1	–	ПГС
Panther	Continuum, USA	410...2500	100	10	7	YAG:Nd	0,06 нм	–	ПГС
Mirage 3000	Continuum, USA	1500...4000	10	10	0,5	YAG:Nd	0,007	–	ПГС
BBO-3BII	U-Oplaz Technologies Inc., USA	200...4000	100	1...100	1...10	YAG:Nd	–	–	Одночастотный ПГС
OPO-C	Polytec PI Inc., USA	205...4000	До 150	50	6...12	YAG:Nd	0,05 нм	–	ПГС
Vega 200	Thomson CSF Laser, France	225... 4000	50	10	10	YAG:Nd	<0,2 см <sup>-1</sup>	–	ПГС
Sunlite EX	Continuum, USA	205...5000	50	10	7	YAG:Nd	0,002 нм	–	ПГС
1100	Aculight Corp., USA	1390...4700	10 <sup>-2</sup>	20000	10	Диодная	10 МГц	–	ПГС
LT-2215	Lotis-TII, Беларусь	410–2300 (205–2300)	до 40	20	5–6	YAG:Nd	< 0,15 нм	4–8	ПГС

## Модернизация приемно-регистрирующей части лидара

Модернизация приемно-регистрирующей части лидара, в первую очередь, связана с обновлением основной части элементов спектральной селекции (поворотные зеркала, интерференционные фильтры). Включение в приемную часть лидара монохроматора обеспечит выделение спектральных диапазонов, формируемых параметрическими генераторами.

В качестве приемников рассеянного назад компонентами атмосферы излучения ультрафиолетового и видимого диапазонов спектра будут применяться современные фотоэлектронные умножители, в том числе и известной зарубежной фирмы HAMAMATSU. Регистрации в ИК-диапазоне будет обеспечена на лавинных фотодиодах, также импортного производства.

## Решаемые геофизические задачи

Модернизация высотного лидара и внедрение накопленных мировым научным сообществом технологий лазерного зондирования представленных выше параметров, характеристик и компонент атмосферы позволят выйти на решение следующих геофизических задач.

Прежде всего, одновременное измерение высотных профилей элементов матрицы обратного рассеяния света и температуры в верхней тропосфере даст возможность более корректно изучать задачу образования в облаках верхнего яруса пространственно ориентированных кристаллических частиц и тем самым решать проблему переноса радиации кристаллическими облаками верхнего яруса. Задача, изначально заложенная в основу разработки поляризационного лидара и сформулированная как исследование оптических характеристик кристаллических облаков, создание соответствующей базы данных и построение на ее основе эмпирико-статистической модели перистой облачности, получит новое развитие.

Экспериментальные и теоретические наработки коллектива по означенной проблеме, полученные в предшествующий период, позволяют определить дальнейшие шаги для реализации модели ориентационного состояния кристаллических облаков. Суть предполагаемых исследований заключается в том, что по небольшому числу входных параметров (высота облачности, вертикальные профили температуры и скорости ветра) можно будет дать вероятностные оценки параметров ориентации. Все входные параметры представляют собой стандартную и легко доступную метеорологическую информацию. Они трансформируются в скорость диссипации энергии, от которой, как показали последние исследования авторов настоящего проекта, в основном зависит эффективность действия механизмов ориентации частиц. Параметры ориентации будут определяться посредством поляризационных лидарных измерений с использованием разработанных ранее методик измерений. Вероятностные

оценки состояния ориентации будут получены из корреляционных связей между входными параметрами и параметрами ориентации.

Решение проблемы меридионального и зонального переноса воздушных масс, в том числе и механизм передачи возмущений атмосферы полярных широт в умеренные широты, связано напрямую с комплексным анализом метеоситуации и данных лидарного зондирования в этих регионах, тех параметров, которые могут являться трассерами исследуемых процессов (аэрозоль, озон и т.д.). Основа для получения данных лазерного зондирования (по параметрам, являющимися трассерами) в полярных регионах заложена: действуют лидары в Якутске и Петропавловске-Камчатском.

Особое место занимает проблема тропосферно-стратосферного обмена. Получение информации по большому спектру атмосферных компонент и параметров, наличие которых характерно только для тропосферы или только для стратосферы, позволит по их совокупному пространственно-временному поведению идентифицировать данные процессы и исследовать их характеристики.

## Заключение

Таким образом, оснащение высотного поляризационного лидара Томского государственного университета, отличительной особенностью которого является наличие в приемном канале трех зеркальных телескопических систем с диаметром входной апертуры 0,5 м, современными лазерными передатчиками и блоками спектральной селекции, позволит выйти не только на качественно новый уровень поляризационных исследований атмосферных аэрозольных образований, но и создаст условия для увеличения количества наблюдаемых атмосферных параметров. А это, в свою очередь, создает базу для проведения комплексных лидарных исследований атмосферных процессов.

Работа выполнена в рамках программы по приоритетному направлению «Развитие инфраструктуры» Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002–2006 гг., государственный контракт № 02.452.11.7032, и при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 05-05-64518.

1. *Unique Research Facilities in Russia*. Paris: Organ. for Economic Co-Operation and Development. 1995. P. 161–164.
2. *Third International lidar Researchers Directory / Compiled by M.P. Cormick*. Atmosph. Sci. Division, NASA Langley Reserch Center, 1993. P. 71.
3. *Кауль Б.В., Краснов О.А., Кузнецов А.Л., Самохвалов И.В.* Поляризационное зондирование аэрозольных образований верхнего яруса // *Оптика атмосф.* 1991. Т. 4. № 4. С. 394–403.
4. *Кауль Б.В., Кузнецов А.Л., Половцева Е.Р.* Измерения матриц обратного рассеяния кристаллических облаков поляризационным лидаром // *Оптика атмосф. и океана*. 1992. Т. 5. № 6. С. 605–607.

5. *Лазерный контроль атмосферы* / Под ред. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
6. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
7. *Наац И.Э.* Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. 180 с.
8. *Зуев В.Е., Козлов Н.В., Макиенко Э.В., Краснов А.А., Кауль Б.Д.* Некоторые результаты по лазерному зондированию микроструктуры стратосферного аэрозоля трехчастотным лидаром // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1977. Т. 13. № 6. С. 648–654.
9. *Белан Б.Д., Ельников А.В., Зуев В.В., Зуев В.Е., Макиенко Э.В., Марицев В.Н.* Результаты исследования оптических и микроструктурных характеристик стратосферного аэрозоля методом обращения лидарных измерений в г. Томске летом 1991 г. // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5. № 6. С. 593–601.
10. *Hauchecorne A., Chanin M.L., Kechhut P.* Climatology and trends of the middle atmospheric temperature (33–87 km) as seen by Rayleigh lidar over the South of France // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 15297–15309.
11. *Whiteway J.A., Carswell A.I.* Lidar observations of gravity wave activity in the upper stratosphere over Toronto // J. Geophys. Res. D. 1995. V. 100. N 7. P. 14113–14124.
12. *Зуев В.В., Марицев В.Н., Бондаренко С.Л., Долгий С.И., Шарабарин Е.В.* Лидарные измерения температуры по рэлеевскому рассеянию света в нижней стратосфере за период май–декабрь 1995 г. // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 10. С. 1386–1393.
13. *Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Serikov I., Ansmann A., Wandinger U., Althausen D., Mattis I., Müller D.* Daytime operation of a pure rotational Raman lidar by use of a Fabry–Perot interferometer // Appl. Opt. 2005. V. 44. N 17. P. 3593–3603.
14. *Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Zuev V.E., Mittev V.M.* Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar // Appl. Opt. 1983. V. 22. P. 2984–2990.
15. *Ansmann A., Riebsell M., Mandinger U., Weikamp C., Voss E., Lahmann W., Michaelis W.* Combined Raman elastic-backscatter lidar for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio // Appl. Phys. 1995. V. 55. P. 18–28.
16. *Godin S., David C. and Lacoste A.M.* Systematic ozone and aerosol lidar measurements at OHP (44° N, 6° E) and Dumont d'Urville (66° S, 120° E) // Proc. 17-th ILRC. Sendai, Japan. 1994. P. 409–412.
17. *Ельников А.В., Зуев В.В., Бондаренко С.Л.* О восстановлении профилей стратосферного озона из данных лидарного зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 12. С. 1112–1118.
18. *Андреев Ю.М., Гейко П.П.* О возможности создания лазерного источника диапазона 0,2–12,0 мкм // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. N 7. С. 616–622.
19. *Андреев Ю.М., Гейко П.П., Кабанов М.В.* Новые кристаллы для перестраиваемых по частоте лазеров // Автометрия. 2004. Т. 40. № 5. С. 119–133.
20. *Ohmer M.C. and Pandey R.* Emergence of Chalcopyrites as Nonlinear Optical Materials // MRS Bull. 1998. N 7. P. 16–22.

*I.V. Samokhvalov, S.M. Bobrovnikov, P.P. Geiko, A.V. Elnikov, B.V. Kaul.* **The development of Tomsk State University LIDAR as unique complex for monitoring of atmosphere.**

The concept of development of Tomsk State University high-altitude lidar as a unique complex for monitoring of atmosphere is described. Main efforts are concentrated on modernization and improvement of technical characteristics of lidar and widening of problems solved with its help.