

Член-корреспондент РАН В.В. Зуев

Сибирская лидарная станция – уникальный экспериментальный комплекс для дистанционных исследований озоносферы

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 29.12.99 г.

Приведено описание Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы СО РАН. Дано обобщение и подведены итоги многолетнего оптического мониторинга озоносферы на СЛС.

Динамические изменения стратосферного озонового слоя (озоносферы) в последние десятилетия приковывают к себе неослабевающее внимание. Успешное развитие экспериментальной базы Института оптики атмосферы совместно с СКБ НП «Оптика» позволило создать в 80-х гг. мощные стационарные лидары для дистанционного зондирования стратосферы и нижней мезосферы. Первый лидар с зеркальным телескопом диаметром 1 м с фокусным расстоянием 2 м был создан в 1985 г. Все комплектующие этого телескопа, включая крупногабаритное зеркало, разрабатывались и создавались в СКБ НП «Оптика». Лидар был размещен в реконструированном помещении. С 1986 г. на этом лидаре начались регулярные наблюдения за стратосферным аэрозолем, а в 1989 г. с помощью его модифицированного варианта были получены первые профили стратосферного озона [1].

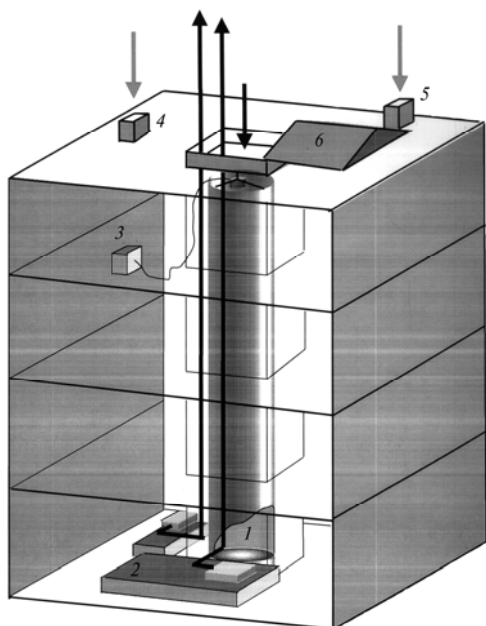


Рис. 1. Здание СЛС с главным приемным зеркальным телескопом в шахте: 1 – 2,2-м зеркало; 2 – лазерные стелды; 3 – приемно-регистрационная аппаратура; 4 – озонметр М-124; 5 – сумеречный спектрофотометр; 6 –двигаемая крыша шахты

Приемное крупногабаритное зеркало диаметром 2,2 м с фокусным расстоянием 10 м для второго лидарного комплекса было изготовлено по спецзаказу на Лыткаринском оптико-механическом заводе, а его напыление проводилось в Ленинградском оптико-механическом объединении. Все остальные комплектующие приемного телескопа изготавливались в СКБ НП «Оптика». Телескоп размещен в шахте в центре четырехэтажного здания, специально построенного для этого

лидарного комплекса, недалеко от первого стационарного лидара. Зеркало телескопа располагалось на уровне первого этажа (рис. 1). На этом же этаже находились основные стелды с лазерными источниками. Регистрация лидарных сигналов осуществлялась в фокальной плоскости зеркала на уровне четвертого этажа.

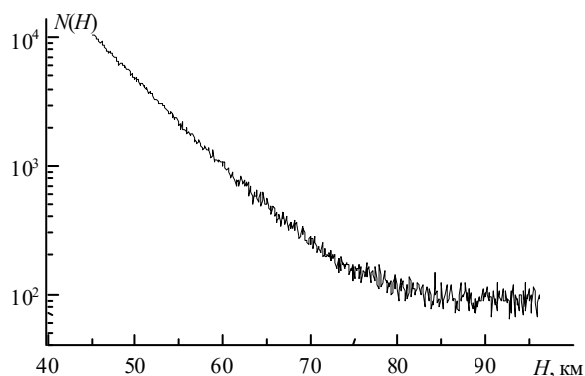


Рис. 2. Лидарный эхосигнал, зарегистрированный на СЛС до высоты 80 км

Первые сигналы на этом лидарном комплексе были получены в 1990 г. На рис. 2 для примера представлен типичный профиль лидарного сигнала, зарегистрированный на комплексе на длине волны 532 нм второй гармоники излучения твердотельного Nd-АИГ-лазера [2]. Видно, что потенциал лидарного комплекса обеспечивает получение информации до высоты около 80 км.

Сибирская лидарная станция (СЛС) формировалась на базе двух стационарных лидарных комплексов. После поиска оптимальных структур СЛС в настоящее время сложилась схема лидарных каналов, изображенная на рис. 3. Основные характеристики этих каналов представлены в табл. 1. В качестве передатчиков излучения в лидарах в параллельном режиме используются лазерные источники, излучающие на длинах волн в УФ (экимерные ХеС1-лазеры) и видимом (Nd-АИГ-лазер) спектральных диапазонах. Наряду с крупногабаритными телескопами дополнительно используются телескопы меньшего диаметра – 0,5 и 0,3 м. Длиннофокусный телескоп с зеркалом 2,2 м обеспечивает регистрацию лидарных сигналов в диапазоне высот 30–60 км, телескоп с диаметром зеркала 1 м – в диапазоне 15–40 км, телескоп с диаметром зеркала 0,5 м – в диапазоне 10–30 км и, наконец, телескоп с диаметром зеркала 0,3 м – в диапазоне 6–15 км. Отсечка сигналов из атмосферных слоев ниже указанных диапазонов высот осуществляется активно с помощью механических отсекателей либо пассивно за счет большой базы передатчик – приемник.

Основные характеристики лидарных каналов СЛС

Параметры лидара	Измеряемые характеристики					
	Озон		Аэрозоль	Температура		
Диаметр зеркала, м	2,2	1	0,3	0,5	2,2	1
Фокусное расстояние, м	10	2	1,5	1,5	10	2
Длина волны зондирования, нм	308/353	308/353	308/353	532; 683	532	353 (384)
Энергия импульса, мДж	80/20	80/20	80/20	100; 50	100	20
Частота следования, Гц	50–200	50–200	50–200	20	20	50–200
Высотный диапазон зондирования, км	30–60	15–40	6–15	10–30	30–60	15–40 (3–15)
Макс. ошибка измерения, %	10	10	15	7	±5K	±3K (±5K)

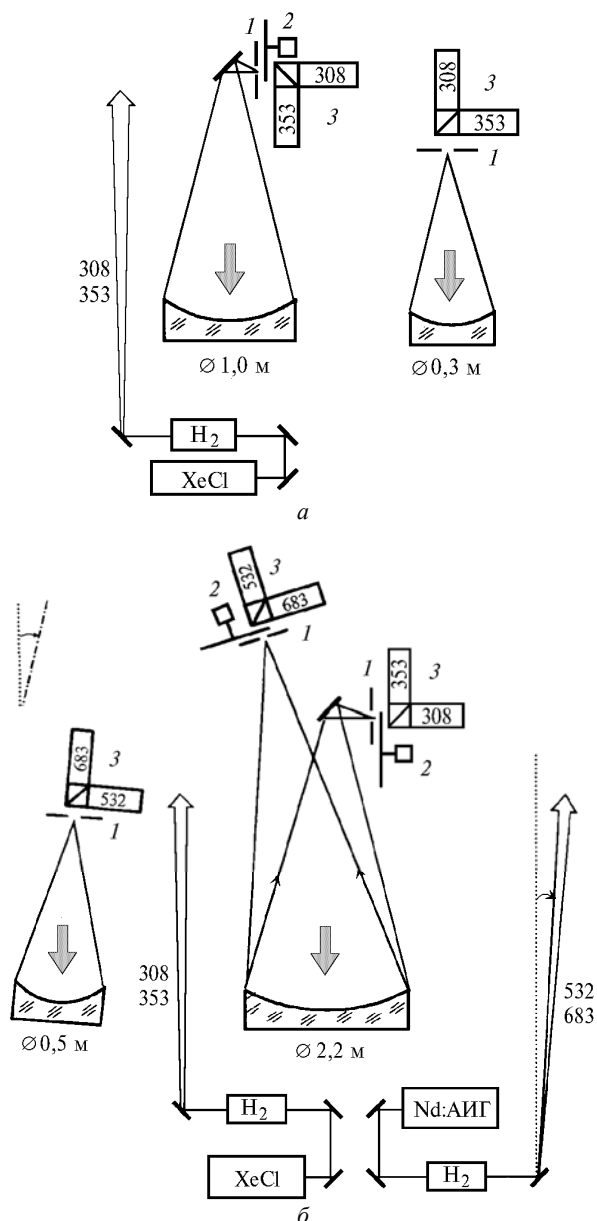


Рис. 3. Современная схема лидарных измерительных каналов на СЛС: *a* – лидарный комплекс с главным приемным зеркалом диаметром 1 м; *б* – лидарный комплекс с главным приемным зеркалом диаметром 2,2 м; 1 – полевая диафрагма; 2 – механический отсекающий блок ближней зоны; 3 – блок спектральной селекции сигналов от ФЭУ; XeCl – эксимерный лазер; Nd:АИГ – твердотельный лазер; H₂ – ячейка ВКР-преобразования с водородом

Возможности лидарных каналов СЛС для дистанционного определения вертикального распределения аэрозоля

(ВРА), озона (ВРО) и температуры (ВРТ) иллюстрируются соответственно на рис. 4, 5 и 6. Методики определения этих характеристик подробно описаны в [3–5]. Следует подчеркнуть, что в режиме двух- или трехчастотного зондирования возможна оценка размеров аэрозольных частиц. В простейшем случае двухчастотного зондирования распределение частиц по размерам качественно можно проанализировать по поведению параметра Ангстрема *X* (рис. 7). Как правило, меньшие значения *X* соответствуют аэрозольным частицам большего размера. Приведенный пример характеризует, с одной стороны, процесс седиментации аэрозольных частиц с локализацией крупной фракции над тропопаузой, с другой стороны, – формирование выраженного слоя Юнге. При трехчастотном режиме удастся решить более сложную задачу – восстановить спектр размеров частиц [6].

Наряду с активными лидарными каналами на СЛС используются каналы пассивного спектрофотометрирования рассеянного в зените неба и прямого солнечного излучения. Фотометрирование яркости сумеречного неба в сине-голубой области спектра позволяет получать информацию об интегральном содержании и вертикальном распределении двуокиси азота (ВР NO₂) [7]. Двуокись азота является одной из наиболее активных фотохимических составляющих стратосферы, которая играет принципиальную роль в каталитических циклах озона. Для примера на рис. 8 приведены зарегистрированные профили двуокиси азота для утренних и вечерних сумерек с типичным максимумом в районе 25–30 км [8]. Наконец, с помощью озонметра М-124 проводятся регулярные измерения общего содержания озона (ОСО). На рис. 9 приведен временной ряд отклонений среднемесячных значений ОСО относительно многолетней нормы, полученный на СЛС за период с января 1994 г. по настоящее время. Ряд характеризуется статистически значимым положительным линейным трендом.

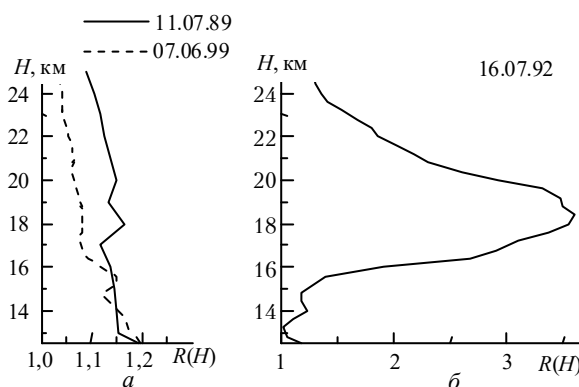


Рис. 4. Высотные профили отношения рассеяния (отношение суммы коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния к коэффициенту обратного молекулярного рассеяния) на длине волны 532 нм для фоновых (*a*) и возмущенного (*б*) состояния стратосферного аэрозольного слоя

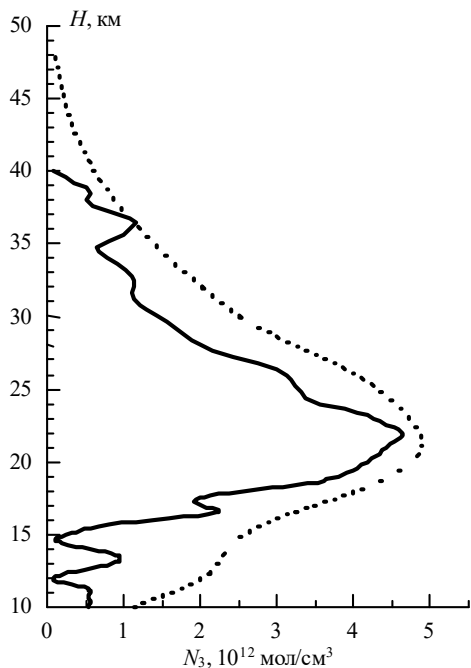


Рис. 5. Высотный профиль вертикального распределения озона (сплошная кривая) от 20 ноября 1999 г. в сравнении с моделью ВРО Крюгера [21] (пунктирная кривая)

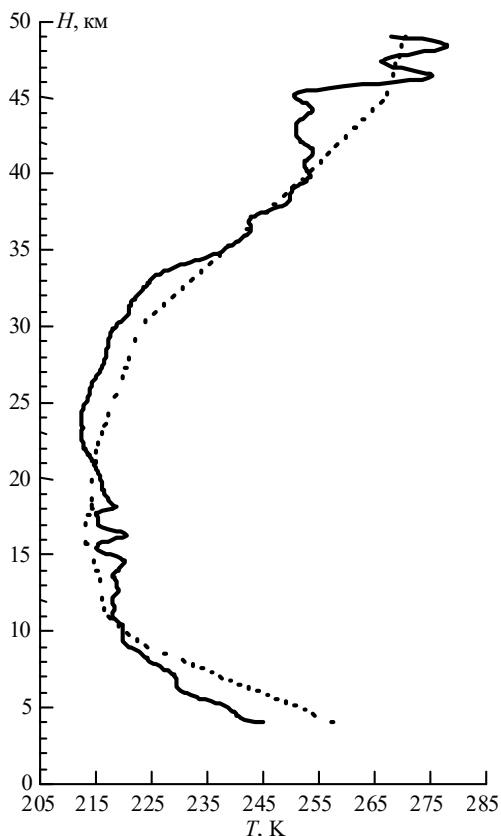


Рис. 6. Высотный профиль вертикального распределения температуры (сплошная кривая) от 20 ноября 1999 г. в сравнении с модельным ВРТ [22] (пунктирная кривая)

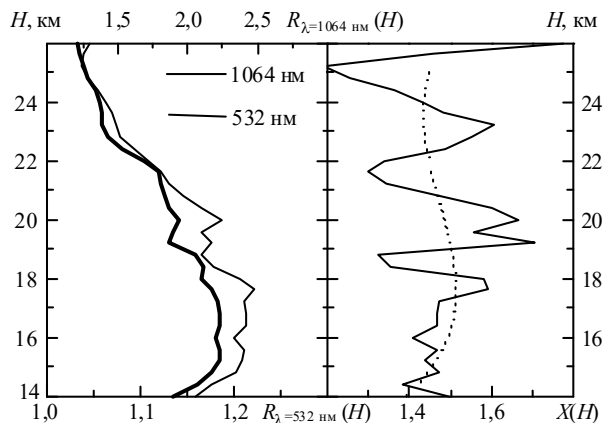


Рис. 7. Высотные профили отношения рассеяния на длинах волн 532 и 1064 нм и параметра X (пунктирной кривой показано полиномиальное сглаживание)

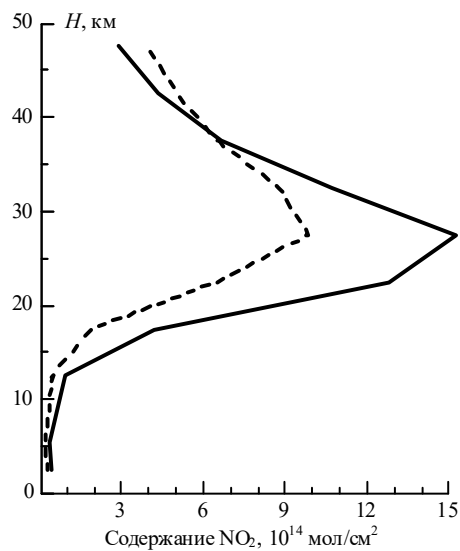


Рис. 8. Вертикальное распределение двуокиси азота по данным утренних (пунктирная кривая) и вечерних (сплошная кривая) измерений от 12 июля 1999 г.

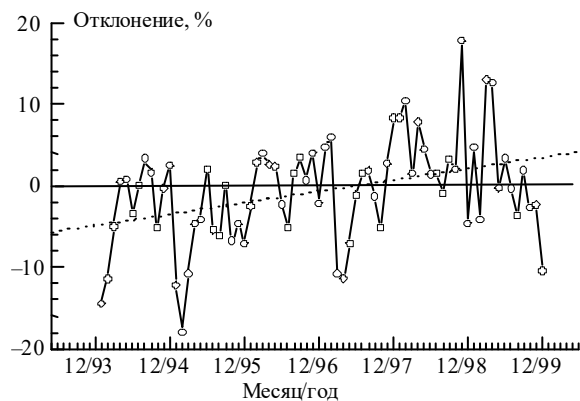


Рис. 9. Временной ход отклонений среднемесячных значений общего содержания озона в период с января 1994 по декабрь 1999 г. относительно многолетней нормы и линейный тренд этого ряда

Регулярно получаемая экспериментальная информация по всем каналам СЛС записывается в общую базу данных. В табл. 2 дана характеристика этой базы данных. Отметим, что представленный перечень измеряемых параметров на СЛС только оптическими методами является необходимым и достаточным для описания основных механизмов трансформации озоносферы.

Факторы фотохимических превращений довольно полно отражаются в совокупной изменчивости ВРО, ВР NO₂ и ВРТ в стратосфере [8]. Влияние динамики атмосферы хорошо отражается в пространственно-временных вариациях всех измеряемых параметров, имеющих выраженное неоднородное географическое и высотное распределение. За счет горизонтально-вертикальных движений в воздушной массе формируются новые высотные распределения измеряемых параметров с частичным сохранением памяти о предыдущих распределениях по маршруту движения. Таким образом, совокупный анализ изменчивости всех измеряемых параметров позволяет определить, какие воздушные массы и какие динамические процессы лежат в основе наблюдаемых изменений в озоносфере. На рис. 10 показан типичный пример крупномасштабной адвекции (вторжения) в средние широты холодной арктической воздушной массы с высоким содержанием озона и типичным арктическим озоновым максимумом в нижней стратосфере. В средней стратосфере понижение содержания озона и сопутствующее ему адиабатическое повышение температуры отражают нисходящие движения в зоне дивергенции потока.

Таблица 2

Характеристика базы экспериментальных данных Сибирской лидарной станции

Параметр	Год начала временного ряда	Количество данных в временном ряде	Примечание
Интегральный коэффициент обратного аэрозольного рассеяния на длине волны 532 нм в высотном диапазоне 10–30 км	1986	Около 150 среднедекадных значений	
Вертикальное распределение аэрозоля (на основе данных об оптических характеристиках аэрозольных частиц для длины волны 532 нм) в высотном диапазоне 10–30 км	1986	Более 450 средненочных профилей	Ряд включает также данные эпизодических измерений на длине волны 510 нм
Вертикальное распределение озона (счетной концентрации молекул) в высотном диапазоне 10–30 (50) км	1989	Более 300 средненочных профилей	
Вертикальное распределение аэрозоля (на основе данных об оптических характеристиках аэрозольных частиц для длин волн 353, 683 и 1064 нм) в высотном диапазоне 10–30 км	1991	Около 150 средненочных профилей	Эпизодические измерения
Общее содержание озона	1993	6-летний ряд средненочных значений	Регулярные ежедневные измерения с помощью озонметра М-124
Вертикальное распределение температуры в высотном диапазоне 10–50 км	1994	Около 200 средненочных профилей	
Вертикальное распределение и интегральное содержание двуоксида азота	1995	4-летний ряд данных сумеречных измерений	Регулярные автоматизированные измерения в вечернее и утреннее время

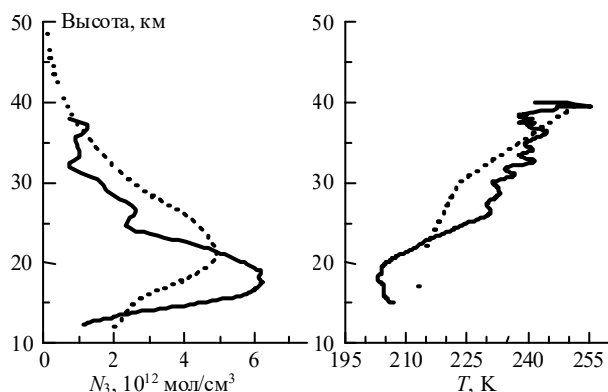


Рис. 10. Высотные профили ВРО и ВРТ от 1 марта 1999 г., в период вторжения холодной арктической воздушной массы (обозначение кривых, как на рис. 5 и 6)

Как видно из табл. 2, ряды экспериментальных данных на СЛС получены за многолетний период. Он вместил в себя и период фонового (невозмущенного) состояния озоносферы, и периоды возмущения озоносферы продуктами извержения вулканов, в особенности мощнейшего извержения вулкана Пинатубо. Ключевые результаты, полученные на СЛС в эти периоды, описаны в [9–20]. Обобщая их, можно сделать следующие выводы.

мируются новые высотные распределения измеряемых параметров с частичным сохранением памяти о предыдущих распределениях по маршруту движения. Таким образом, совокупный анализ изменчивости всех измеряемых параметров позволяет определить, какие воздушные массы и какие динамические процессы лежат в основе наблюдаемых изменений в озоносфере. На рис. 10 показан типичный пример крупномасштабной адвекции (вторжения) в средние широты холодной арктической воздушной массы с высоким содержанием озона и типичным арктическим озоновым максимумом в нижней стратосфере. В средней стратосфере понижение содержания озона и сопутствующее ему адиабатическое повышение температуры отражают нисходящие движения в зоне дивергенции потока.

1. Впервые было показано, что озоновая депрессия вследствие возмущения озоносферы вулканогенным аэрозолем после взрывных извержений вулканов сохраняется на протяжении 3–4 лет [19]. Эта депрессия вызывается не только гетерогенными взаимодействиями молекул стратосферного озона на поверхности частиц вулканогенного аэрозоля, но также связана с изменениями радиационного режима стратосферы вследствие резкого увеличения ее альбедо из-за появления в ней вулканогенных облаков. Именно этот фактор ответствен за продолжительный характер депрессии озоносферы. Искажение радиационно-теплового баланса стратосферы влияет и на баланс фотохимических циклов стратосферного озона, и на изменение стратосферной циркуляции. В частности, усиливается меридиональный перенос в стратосфере, в особенности в зимне-весенний холодный период времени, который может приводить к сильному выносу в средние широты тропических воздушных масс с низким ОСО.

2. Впервые были сформулированы и аргументированы критерии фонового состояния стратосферного аэрозольного слоя [14]. Они основаны на отсутствии значимых различий среднесезонных (зима, лето) профилей аэрозольной стратификации и однородном высотном распределении аэрозоля в стратосфере. Фоновое состояние стратосферного аэрозольного слоя определяет невозмущенное фоновое состояние озоносферы. Показано, что фоновое

состояние озоносферы наблюдается лишь со второй половины 1995 г. по настоящее время [19]. Поведение озоносферы в течение продолжительного периода в 80-х и первой половине 90-х гг. искажалось влиянием вулканогеогенного аэрозоля после извержений вулканов Сент-Хеленс (1981 г.), Эль-Чичон (1982 г.), Дель-Руис (1985 г.), Келут (1990 г.) и Пинатубо (1991 г.).

3. Впервые было спрогнозировано восстановление стратосферного озонового слоя на рубеже XX и XXI вв. [20]. Наблюдаемый на СЛС неуклонный рост ОСО с 1993 г. сохранился и в настоящий период фоновое состояние озоносферы. Положительный тренд среднемесячных значений ОСО с января 1994 по декабрь 1999 г. составляет $(1,44 \pm 0,41)$ % в год. В настоящее время восстановление озоносферы, по крайней мере в средних широтах, – уже факт глобального масштаба.

В заключение отметим, что созданная в Институте оптики атмосферы Сибирская лидарная станция включена в Перечень уникальных научно-исследовательских и экспериментальных установок России, что является признаком ее мирового уровня и уникальности реализованного на ней комплексного подхода в исследовании озоносферы. Считаю своим приятным долгом выразить слова глубокой благодарности всему коллективу лаборатории дистанционной спектроскопии атмосферы за бескомпромиссное служение науке, титанические усилия при создании СЛС и сохранение регулярных наблюдений.

Работа выполнялась благодаря частичной финансовой поддержке Миннауки РФ на установке «Сибирская лидарная станция» (рег. № 01-64) и РФФИ (грант № 99-05-64943).

1. Зув В.В., Ельников А.В., Маричев В.Н., Царегородцев С.И. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 9. С. 995–996.
2. Бондаренко С.Л., Бурлаков В.Д., Гришаев М.В., Зув В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 11. С. 1652–1655.
3. Зув В.В., Ельников А.В., Маричев В.Н. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 2. С. 201–209.
4. Зув В.В., Ельников А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 10. С. 1050–1054.

5. Зув В.В., Маричев В.Н., Бондаренко С.Л. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 12. С. 1615–1619.
6. Зув В.В., Белан Б.Д., Ельников А.В., Зув В.Е., Макиенко Э.В., Маричев В.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 6. С. 593–601.
7. McKenzie R.J., Jonston P.V., McElroy C.T., Kerr J.B., Solomon J.B. // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № D8. P. 15499–15511.
8. Marichev V.N., Zuev V.V., Grishaev M.V., Smirnov S.V. // Advances in atmospheric remote sensing with lidar: selected papers of the 18th Inter. Laser Radar Conf., Berlin, 22–26 July 1996 / A. Ansmann, R. Neuber, P. Rairoux, U. Wandinger (eds.). Berlin: Springer-Verlag, 1996. P. 549–552.
9. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зув В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л., Смирнов С.В., Столярова Н.А. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 10. С. 1224–1233.
10. Зув В.В., Гришаев М.В., Маричев В.Н., Смирнов С.В. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 10. С. 1170–1180.
11. Бурлаков В.Д., Зув В.В., Ельников А.В., Гришаев М.В., Правдин В.Л. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 10. С. 1496–1500.
12. Зув В.В., Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Смирнов С.В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 12. С. 1599–1603.
13. Ельников А.В., Зув В.В., Маричев В.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 12. С. 1320–1324.
14. Зув В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 3. С. 268–274.
15. Маричев В.Н., Зув В.В., Хряпов П.А., Долгий С.И., Невзоров А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 428–433.
16. Зув В.В., Маричев В.Н., Смирнов С.В. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 10. С. 902–910.
17. Zuev V.V., Burlakov V.D., El'nikov A.V. // J. Aerosol Sci. 1998. V. 29. N 10. P. 1179–1187.
18. Зув В.В., Смирнов С.В. // Известия вузов. Физика. 1998. Т. 41. № 9. С. 75–82.
19. Зув В.В., Маричев В.Н., Смирнов С.В. // Известия АН. Сер. ФАО. 1999. Т. 35. № 5. С. 1–10.
20. Зув В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 12. С. 1356–1357.
21. Krueger A.J., Minzner R.A. // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 4477–4481.
22. Зув В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.

V.V. Zuev. Siberian Lidar Station – the unique experimental complex for remote investigations of the ozonosphere.

The Siberian Lidar Station (SLS) of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS (Tomsk) is described in the paper. The results of many year optical monitoring of the ozonosphere at the SLS are generalized and reviewed.