

**А.П. Иванов, Ф.П. Осипенко, А.П. Чайковский, В.Н. Щербаков**

### **ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРАТОСФЕРЫ В ПЕРИОД ПОСЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ПИНАТУБО ПО ДАННЫМ СПЕКТРОПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Приведены результаты экспериментальных исследований методом спектрополяризационного лазерного зондирования стратосферного аэрозольного слоя (САС) в период после извержения вулкана Пинатубо. Анализируется зависимость от времени оптической толщины слоя на длине волны 532 нм. Приведены зарегистрированные профили отношения рассеяния, аэрозольного коэффициента деполаризации излучения при рассеянии в направлении <назад>, результаты зондирования стратосферы на двух длинах волн (532 и 1064 нм). Обсуждаются особенности формирования микрофизических параметров САС Пинатубо.

Экспериментальные исследования стратосферного аэрозольного слоя ведутся в Институте физики АН Беларуси (г. Минск, 53,85°N, 27,5°E) на лидарной станции АНБ-314 [1] начиная с 1985 года. Лидарная станция включает приемный телескоп диаметром 500 мм, с которым сопряжен оптический анализатор, разводящий отраженное атмосферой излучение по четырем каналам. Оптическая схема анализатора дает возможность вести измерения на двух длинах волн с одноременной регистрацией кроссполаризованных компонентов излучения. Приемная система снабжена механической <отсечкой ближней зоны>, которая обеспечивает линейность режима счета фотонов работы электронных фотоумножителей (ФЭУ-140 для видимого и ФЭУ <Комета> для ИК-излучения). Блок управления и обработки информации позволяет проводить оцифровку сигналов с минимальным пространственным разрешением 64 м. В качестве источника излучения в лидарной станции в настоящее время используется промышленный лазер <ИЛТИ-405Б>. Зондирование стратосферы выполняется на двух длинах волн 0,532 и 1,064 мкм. Обработка лидарных сигналов и расчет отношения рассеяния  $R(h) = [\beta_a(h) + \beta_m(h)] / \beta_m(h)$ , где  $\beta_a(h)$  и  $\beta_m(h)$  – соответственно профили аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния, ведутся с учетом ослабления излучения аэрозолями по предложенному в работе [2] алгоритму. Методика определения профилей аэрозольного коэффициента деполаризации излучения описана в [3].

Для второй половины 80-х годов до июня 1991 года было характерным отсутствие крупных вулканических выбросов в стратосферу. Состояние аэрозольного слоя постепенно приближалось к фоновому. Извержение вулкана Пинатубо завершило этот период релаксации стратосферы к равновесному состоянию после сопоставимого по мощности извержения вулкана Эль-Чичон. Интегральные характеристики распределения показателя обратного рассеяния, полученные в Институте физики АН Беларуси в это время, были близки к соответствующим данным других авторов [4].

Наличие в стратосфере слоев, образованных продуктами извержения вулкана Пинатубо, впервые проявляется в экспериментальных данных, относящихся к началу июля 1991 года. В этот период их мощность была незначительной: 4.07.91 г. зарегистрирован слой с  $R = 1,65$  в максимуме на высоте 15,3 км, 8.07.91 г. –  $R = 1,74$  при  $h = 14,8$  км, 9.07.91 г. –  $R = 1,66$  при  $h = 15,3$  км. В профилях  $R(h)$ , полученных в конце июля и начале августа, значение отношения рассеяния не превышало 1,37 (данные приведены для  $\lambda = 0,532$  мкм). Достаточно отчетливо последствия воздействия извержения Пинатубо на САС начали проявляться с 9.08.91.

На рис. 1 для периода июнь 1991 г. – сентябрь 1992 г. представлена временная зависимость параметра

$$I(h_1, h_2) = \int_{h_1}^{h_2} \beta_a(h') dh' \quad (1)$$

для  $h_1 = 13$  км и  $h_2 = 30$  км. Такой диапазон высот выбран на основании того, что для широты г. Минска тропопауза, как правило, располагается не выше 13 км. Видно, что оптическая плотность САС в результате поступления продуктов извержения вулкана Пинатубо в течение пяти месяцев, флуктуируя, возросла почти в 70 раз. В январе 1992 года достаточно отчетливо наблюдается ее локальное понижение, что согласуется с экспериментальными данными НПО <Тайфун> г. Обнинск (частное сообщение проф. С.С. Хмелевцова). В феврале значение  $I(h_1, h_2)$  снова возросло и затем начало происходить его постепенное понижение при относительно небольших флуктуациях.

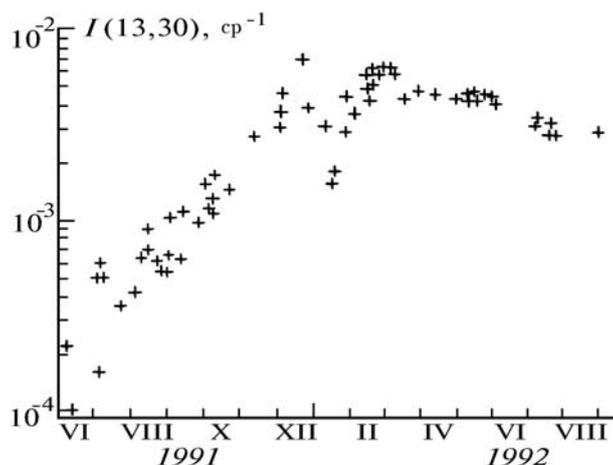


Рис. 1. Зависимость от времени параметра  $I(13, 30)$

Заметные вариации параметра  $I(h_1, h_2)$ , количества зарегистрированных слоев, их местоположения, мощности, значений отношения рассеяния в максимуме наблюдались в июле–октябре 1991 г. Это, например, видно из рис. 2, а, где приведены некоторые из профилей. (На рис. 2 каждой из кривых соответствует своя шкала оси иксов). Судя по зависимостям  $R(h)$ , в этот период продукты извержения распространялись в САС средних широт в основном на высотах  $h \geq 15 \div 25$  км и их перемешивание было незначительным. К ноябрю 1991 года произошло формирование устойчивого САС. На этом фоне продолжали проявляться отдельные максимумы. Довольно часто их было несколько (см. рис. 2, б). Максимальная величина отношения рассеяния на лидарной станции г. Минска была зарегистрирована 25.12.91. На высоте 19,8 км  $R(h)$  имело значение 13,2.

Некоторые типичные зависимости  $R(h)$  для периода 1992 г. приведены на рис. 2, в. Видно, что для июня–августа оказалось характерным отсутствие значимых локальных максимумов в профилях отношения рассеяния.

Удобным средством контроля фазового состава зарекомендовал себя метод регистрации профилей  $Q_a(h)$  степени деполаризации отраженного аэрозолем в направлении <назад> излучения. Алгоритм расчета  $Q_a(h)$  и методика проведения эксперимента описаны в [3]. Их особенностью является то, что проводится дополнительное калибровочное измерение, в котором зондирующее излучение имеет линейную поляризацию в плоскости, ориентированной под углом в  $45^\circ$  к осям анализатора приемной системы. В этом случае оба канала (регистрирующие кроссполаризованные компоненты излучения) по отношению к отраженному атмосферой свету оказываются равноправными. Профили числа зарегистрированных фотонов совпадают с точностью до постоянного множителя, который взаимосвязан с коэффициентами усиления каждого из трактов. Отличия обусловлены лишь шумами. Поэтому дополнительное калибровочное измерение помимо повышения точности обработки информации (отсутствие необходимости априорно задавать значение  $Q_a(h)$  в точке привязки) позволяет контролировать уровень погрешностей счета фотонов обоих каналов по всей трассе зондирования.

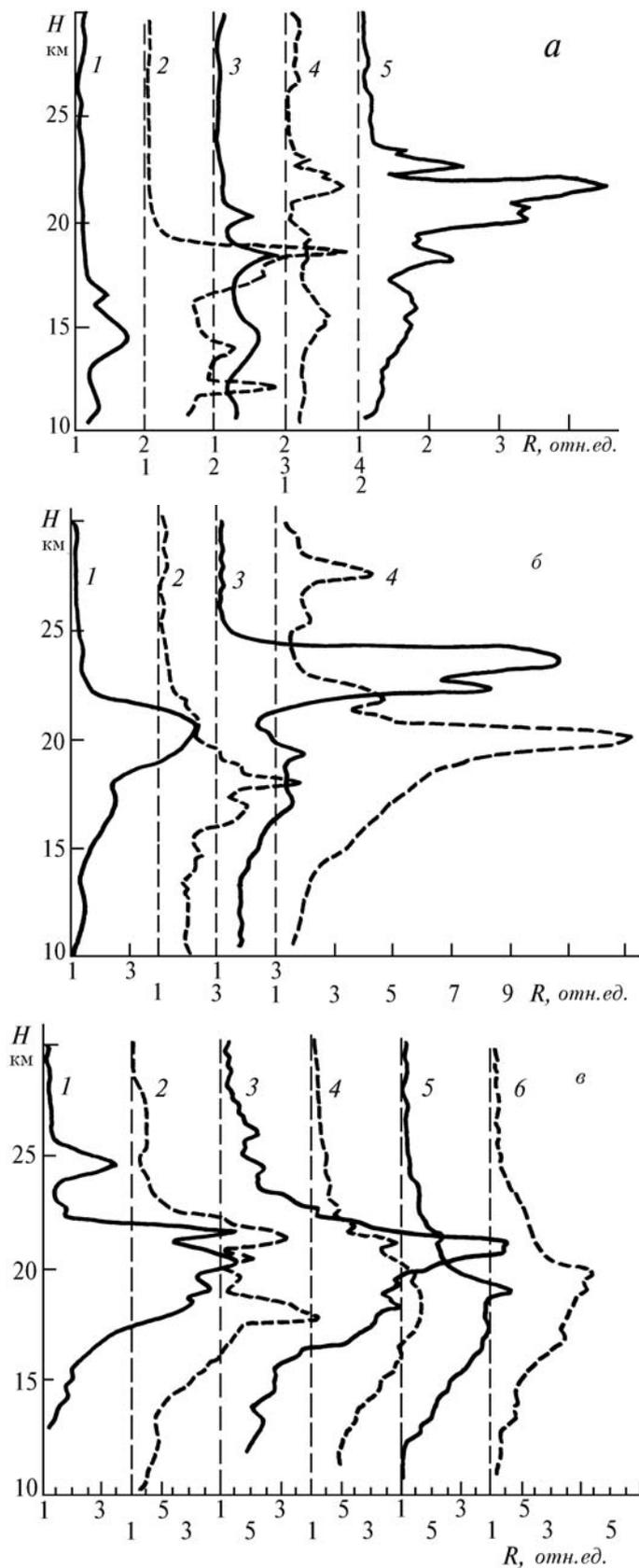


Рис. 2. Профили отношения рассеяния  $R(h)$  на длине волны  $\lambda = 532$  нм: (а) кривая 1 – 8.07.91; 2 – 14.08.91; 3 – 12.09.91; 4 – 26.09.91; 5 – 11.10.91; (б) кривая 1 – 14.11.91; 2 – 6.12.91; 3 – 8.12.91; 4 – 25.12.91; (в) кривая 1 – 31.01.92; 2 – 18.02.92; 3 – 2.03.92; 4 – 1.06.92; 5 – 10.07.92; 6 – 30.08.92

Общей закономерностью для данных, полученных на лидарной станции Института физики АНБ после извержения Пинатубо, является следующее. Параметр  $Q_a(h)$  в САС, образованном продуктами извержения, как правило, имеет более низкие значения, чем в соседних слоях (см. рис. 3, *а*, здесь же приведен профиль  $R(h)$ ). Сама по себе величина  $Q_a(h)$  также незначительна. Это, с нашей точки зрения, свидетельствует о том, что частицы в САС в основном сферические (жидкокапельные).

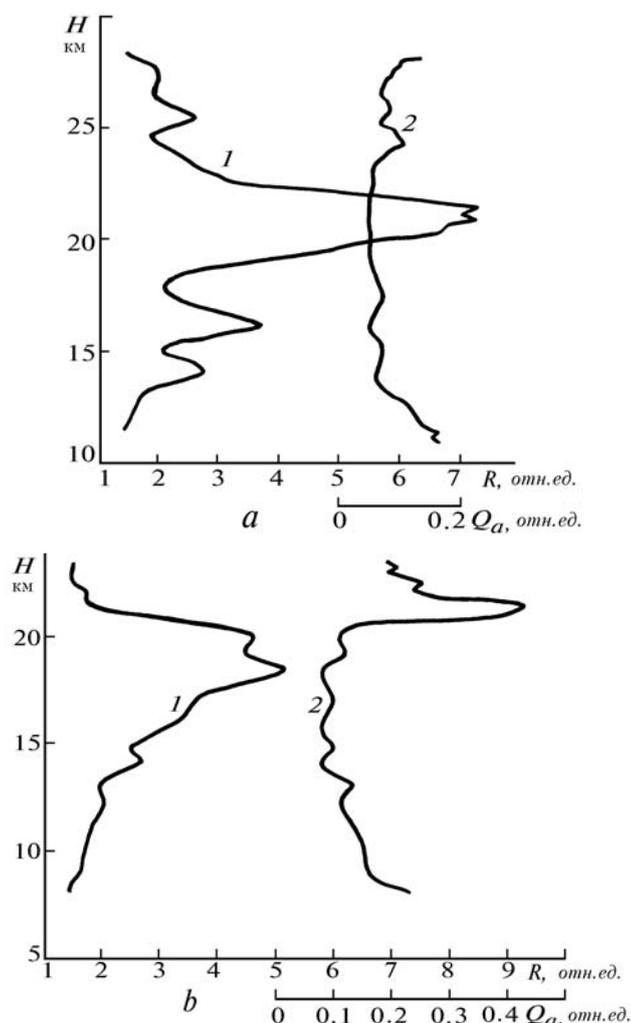


Рис. 3. Профили отношения рассеяния  $R(h)$  (1) и коэффициента деполаризации  $Q_a(h)$  (2); *а* – 19.02.92, *б* – 7.12.91

Данные измерений высотных зависимостей  $Q_a(h)$  согласуются с результатами работы [5], где отмечалась <очень низкая деполаризация в области основного слоя Пинатубо>. По данным измерений в 1991–1992 гг. профили  $Q_a(h)$ , как правило, имели вид и числовые значения, аналогичные рис. 3, *а*. Вместе с тем, встречались зависимости типа изображенных на рис. 3, *б*, где значения  $Q_a(h)$ , в целом, несколько выше и наблюдается их рост вне интервала высот слоя Пинатубо. Возможно, такого рода тенденции обусловлены процессами замерзания частиц при низких температурах в стратосфере.

Вариации спектральных зависимостей оптических параметров дисперсной среды дают возможность судить об изменчивости их микрофизических характеристик. В настоящей статье для этих целей используется анализ различий в профилях отношения рассеяния, зарегистрированных для двух длин волн  $\lambda = 532$  и  $\lambda = 1064$  нм.

Лазерное зондирование на длине волны  $\lambda=1064$  нм удобно тем, что в качестве источника используется тот же лазер, что и для  $\lambda=532$  нм. Однако несмотря на относительно большую мощность излучения, измерения в режиме счета фотонов в ИК-диапазоне сопряжены с пре-

одолением ряда технических трудностей (современные ФЭУ обладают в этом спектральном интервале низкой квантовой эффективностью). Поэтому для удовлетворительной регистрации профилей отраженного атмосферой в направлении <назад> излучения необходимо производить специальный отбор фотоприемников, посредством охлаждения подавить тепловые шумы ФЭУ, для каждого экземпляра подбирать на стенде оптимальные напряжения питания диодов, увеличивать время накопления (до 50000 вспышек лазера на одно измерение). Указанные процедуры дают возможность вести лазерное зондирование стратосферного аэрозольного слоя в режиме счета фотонов при  $\lambda = 1064$  нм. Осуществление привязки для  $\lambda = 1064$  нм достаточно затруднено. В описываемый период измерений, как правило, оказывалось, что в области тропопаузы концентрация аэрозоля существенна и варьируется заметным образом, а для высот, превышающих 25 км, зарегистрированный сигнал был слишком зашумлен. В этой связи, с нашей точки зрения, более объективным является анализ не самих профилей  $R(h, \lambda = 1064)$  или отношения  $\beta_a(h, \lambda_1) / \beta_a(h, \lambda_2)$ , а высотной изменчивости параметра

$$\alpha(h) = \frac{\beta_a(h, \lambda_1) \beta_a(h', \lambda_2)}{\beta_a(h, \lambda_2) \beta_a(h', \lambda_1)}. \quad (2)$$

Как показали численное моделирование и опыт обработки реальных экспериментальных данных, значения характеристики  $\alpha(h)$  достаточно слабо зависят от априорного выбора величины отношения рассеяния в точке привязки и вместе с тем профиль  $\alpha(h)$  позволяет судить о пространственных вариациях микроструктуры аэрозоля.

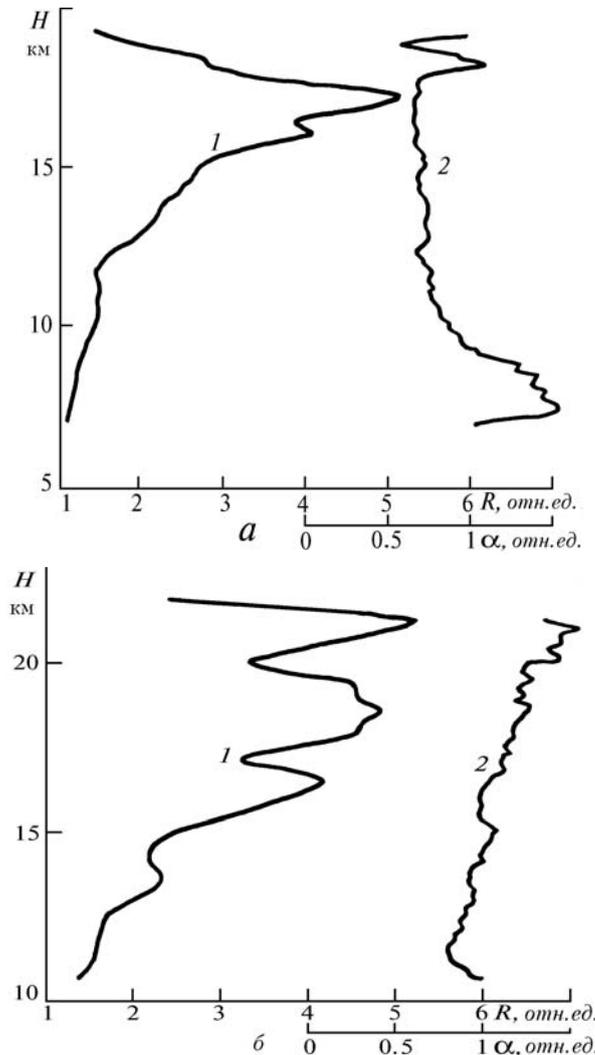


Рис. 4. Профили отношения рассеяния  $R(h)$  (1) и параметра  $\alpha(h)$  (2); а – 13.01.92, б – 2.05.92

Для данных лазерного зондирования атмосферы в период после извержения вулкана Пинатубо оказались типичными два вида профилей  $\alpha(h)$ . Первый из них характерен для результатов измерений периода ноябрь 1991 г. – январь 1992 г. (см., например, рис. 4, а, на этом же рисунке приведен также профиль отношения рассеяния для  $\lambda = 532$  нм). Такая зависимость  $\alpha(h)$  свидетельствует о том, что наблюдалось увеличение среднего размера частиц в интервале от 10 до 12 км, его квазинейтральный ход в диапазоне высот положения максимума САС и затем некоторое уменьшение. (Естественно, что сделанные выводы относятся к размерам частиц, оптически активным в спектральном интервале  $532 \div 1064$  нм).

Для периода начиная с февраля 1992 г. был характерным второй тип профилей  $\alpha(h)$  (см., например, рис. 4, б). Такого рода зависимости параметра  $\alpha(h)$  могут быть объяснены понижением значения среднего размера рассеивателей с изменением высоты.

Практически для всего периода измерений САС, образованного продуктами извержения Пинатубо, оказалось характерным наличие в профилях  $R(h)$  нескольких достаточно значимых локальных максимумов. Подчеркнем, что приведенные на рис. 2–4 экспериментальные данные получены с пространственным разрешением 128 метров и число накопленных фотонов в каждом из стробов было вполне статистически обеспеченным. Кроме того, в силу конструктивных особенностей лидарной станции <АНБ-314> даже при измерениях интенсивности эхосигнала (без учета поляризационных эффектов) регистрация на длине волны  $\lambda = 532$  нм осуществляется также в двух каналах одновременно. Отличие состоит в том, что по второму тракту отводится 10% излучения.

Естественно, что локальные максимумы и минимумы в профилях отношения рассеяния, полученных при обработке каждого из сигналов, совпадают. Отличие состоит в более значимом шумовом компоненте для второго канала. Поскольку каждый из трактов представляет собой самостоятельную оптико-электронную систему, отмеченные особенности профилей  $R(h)$  отражают истинные физические свойства формирования САС. Отметим, что время регистрации одной кривой составляет порядка 50 мин, а всего цикла (с учетом поляризационных и калибровочных измерений) – несколько часов. Существенных изменений в профилях за такой временной интервал не наблюдается. Это свидетельствует о наличии крупномасштабных неоднородностей в САС. Причем неоднородность САС заключается в основном в наличии слоистой структуры с различными значениями концентрации аэрозольных частиц. Микрофизические характеристики рассеивателей в исследуемом интервале высот существенно стабильнее. Это, например, хорошо видно из рис. 3–4.

## Выводы

Вследствие извержения вулкана Пинатубо оптическая толщина  $\tau$  стратосферного аэрозольного слоя увеличилась на широте  $53,85^\circ\text{N}$  приблизительно в 70 раз. Рост  $\tau$  наблюдался до декабря 1991 г. включительно. В январе 1992 г. зарегистрирован локальный минимум  $\tau$ , с февраля 1992 г. оптическая толщина САС уменьшалась при относительно небольших флуктуациях.

Устойчивый САС образовался в интервале высот от тропопаузы до  $h = 25$  км. В нем во многих случаях наблюдалась слоистая структура, обусловленная вариациями концентрации аэрозольных частиц при достаточно стабильных микрофизических параметрах рассеивателей.

Результаты измерений профилей аэрозольного коэффициента деполяризации  $Q_a(h)$  свидетельствует о том, что САС образован сферическими (жидко-капельными) частицами. В отдельные периоды вне основного максимума регистрировались слои с повышенным содержанием несферических рассеивателей.

Для оптически активных в спектральном интервале  $532 \div 1064$  нм аэрозольных частиц данные двухчастотного зондирования показывают, что их средний размер в САС до января 1992 г. включительно был квазипостоянен, а с февраля – уменьшался в зависимости от высоты.

1. Бородавко А.Н., Воробей Н.П., Губский В.И. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т.1. №3. С. 109–115.
2. Чайковский А.П., Щербаков В.Н. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. №5. С. 552 – 554.
3. Чайковский А.П. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. №11. С. 1221 – 1223.
4. Иванов А.П., Хмелевцов С.С., Чайковский А.П., Щербаков В.Н. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1992 (в печати).
5. Young S.A., Manson P.J., Retterson G.R. // 17-th International Laser Radar Conference. 1992. P. 3 – 6.

A.P. Ivanov, F.P. Osipenko, A.P. Chaikovsky, V.N. Shcherbakov. **Optical Characteristics of the Stratosphere after the Mt. Pinatubo Eruption as Assessed from Spectral Polarization Lidar Measurements.**

Some results of experimental investigations by the method of spectral-polarization laser probing of the stratospheric aerosol layer (SAL) after the eruption of the Mt. Pinatubo volcano are given. Time dependence of optical thickness at 532 nm is analyzed. Scattering ratio profiles, the profiles of aerosol backscatter depolarization ratio as well as the results of lidar observations of the stratosphere at 532 nm and 1064 nm are given. Some peculiarities in microphysical parameters of SAL due to Mt. Pinatubo eruption are discussed.