

Лидарные наблюдения аэрозольных вулканических слоев в стратосфере Западной Сибири в 2008–2010 гг.

В.Н. Маричев¹, И.В. Самохвалов^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 29.01.2010 г.

Приведены основные результаты по лидарному зондированию вертикальной структуры стратосферного аэрозоля над Томском за 2008–2010 гг. Показаны итоги модернизации лидарного комплекса. Представлены наблюдения за вулканическим и фоновым аэрозолем, выполненные на современном лидарном комплексе. Подтверждены сезонные особенности стратификации фонового аэрозоля в верхней тропосфере и стратосфере над Томском, выявленные ранее. Прослежена динамика переноса аэрозоля, образовавшегося в результате извержений вулканов островов Алеутской и Курильской гряд над Западной Сибирью. Также зарегистрированы отдельные случаи появления аэрозольного слоя в тропосфере от влк. Эйяфьятлайокудль.

Ключевые слова: лидар, аэрозоль, стратосфера, вулканические аэрозольные слои; lidar, aerosol, stratosphere, volcanic aerosol layers.

Лидарные исследования вертикальной структуры аэрозоля в стратосфере и верхней тропосфере над Томском, проводимые на малой станции высотного зондирования атмосферы ИОА (МСВЗА) на регулярной основе, были начаты в 1986 г. Более чем за 15-летний период были накоплены многолетние ряды наблюдений за вертикальной стратификацией аэрозоля в атмосфере умеренных широт, которые, в силу расположенности единственного пункта зондирования в континентальной зоне Сибири, следует отнести к уникальным. За этот период были получены следующие важные и интересные результаты. Так, были выявлены неустойчивость аэрозольной стратификации весной и ее стабилизация летом, обнаружено образование кратковременных рассеивающих слоев на высотах 22–25 и 30–40 км, коррелирующее по времени с возникновением сильных магнитных бурь [1–4]. Во времена поствулканического возмущения стратосферы (июль 1991–1995 г.) отслежена динамика распространения и изменчивости эруптивного аэрозольного облака от извержения влк. Пинатубо, даны интегральные и дифференциальные оценки аэрозольного наполнения стратосферы [5, 6]. На основе анализа рядов наблюдений за 1996–2000 гг. установлено влияние глобальных геофизических процессов на изменчивость вертикальной структуры аэрозоля, а также вертикального распределения озона и температуры в стратосфере над Томском [7].

Вследствие длительной эксплуатации лидарного комплекса, с описанием которого можно ознакомить-

ся в работе [3], основная часть его оборудования и электронно-регистрационные узлы технически и морально устарели и с 2002 г. начался период модернизации станции в целом, который был завершен в 2008 г. В результате модернизации была проведена замена главного приемного зеркала (диаметр 1 м) с утратившим отражательные качества покрытием на зеркало с новым напылением. В передатчике был установлен достаточно мощный Nd:YAG-лазер с энергией в импульсе до 200 мДж и частотой посылки импульсов 10 Гц на длине волны 532 нм. На выходе в атмосферу лазерный луч коллимировался расширителем пучка в соотношении 1:10 до расходимости 0,1 мрад. Угол поля зрения приемного телескопа составлял 0,5 мрад. В приемной системе были созданы три канала приема оптического излучения: стратосферный и тропосферный на длине волны $\lambda = 532$ нм и СКР-канал (рамановский) на $\lambda = 607$ нм (рис. 1).

Спектральная селекция излучения в каналах проводилась интерференционными светофильтрами фирмы Вагг с шириной пропускания на полувысоте 0,5 нм и пропусканием в максимуме 60%. Для приема излучения использовались работающие в режиме счета фотонов малошумящие фотоприемники R7207-01 и фотоприемный блок с регулируемым электронным запирающим фотокаатода Н8259-01 фирмы Hamamatsu, обладающие высокой квантовой эффективностью (до 30%) и быстродействием. Регистрация преобразованных в одноэлектронные импульсы лидарных сигналов осуществлялась заменяемыми быстродействующими счетчиками фотонов: РММ-328, РН COUNT-4 или PMS-400A (2 канала, полоса 800 МГц; на рисунке не приведен).

* Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru); Игнатий Викторович Самохвалов (sam@elefot.tsu.ru).

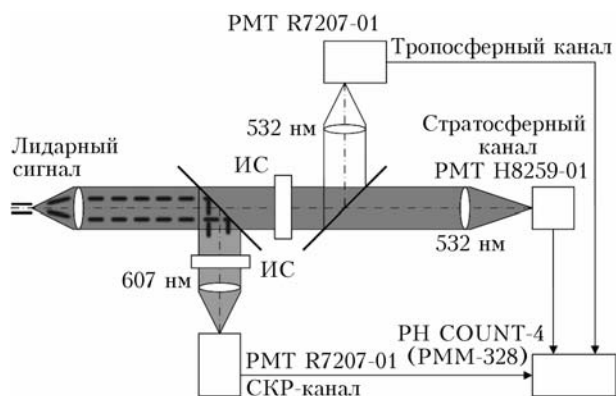


Рис. 1. Блок-схема приема сигналов упругого и рамановского рассеяния света (тропосферный канал – 8%, стратосферный канал – 92%). PMT H8259-01 и PMT R7207-01 – ФЭУ фирмы Hamamatsu, счетчики фотонов PMM-328 (8 каналов, полоса 120 МГц) фирмы Becker & Hickl, и PH COUNT-4 (4 канала, полоса 330 МГц) разработки ИОА СО РАН; ИС – интерференционные светофильтры

Модернизированный и представленный на рис. 1 лидарный комплекс предназначен для зондирования нижней и средней атмосферы с целью получения вертикальных профилей аэрозоля и температуры [8]. Ввод тропосферного канала позволил принимать сигналы с меньших высот, которые создают перегрузки ФЭУ основного стратосферного канала и отсекаются электронным затвором. «Сшивание» сигналов двух каналов дает возможность получить непрерывный сигнал, по которому может рассчитываться протяженный вертикальный профиль стратификации аэрозоля с охватом верхней тропосферы, стратосферы и мезосферы. Указанные сигналы в количестве одноэлектронных импульсов ФЭУ приведены на рис. 2.

Рамановский канал создан для более точного выделения аэрозольной компоненты при нормировке тропосферного сигнала (упругого рассеяния) на сигнал комбинационного рассеяния, который пропорционален реальной плотности атмосферного воздуха. В рассматриваемом здесь случае при анализе вулканических слоев такая точность оказывается излишней.

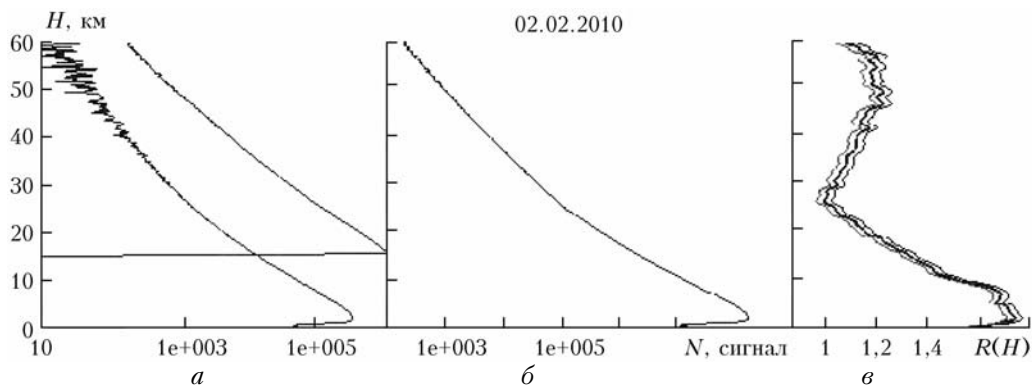


Рис. 2. Суммарные сигналы тропосферного (нижняя кривая) и стратосферного (верхняя кривая) каналов за 02.02.2010 г. (а), «сшитый сигнал» в точке $H = 27$ км (б) и восстановленный по нему непрерывный профиль аэрозольного отношения рассеяния $R(H)$ (в). На рис. 2, в и всех последующих профили $R(H)$ (жирные линии) приведены с указанием стандартного отклонения (тонкие линии)

Ниже представлены результаты наблюдений, полученные в 2008–2010 гг. с помощью модернизированного лидарного комплекса. Для указанного периода характерным являлась активная вулканическая деятельность на дальневосточных островах Тихого океана, приводящая к возмущениям аэрозольной компоненты стратосферы. В 2008 г. на гряде Алеутских островов произошло извержение двух вулканов: Окмок (12 июля) и Касаточи (8 августа) с высотой выброса 15 и 13–15 км соответственно. А 12 июня 2009 г. произошло самое мощное извержение влк. Пик Сарычева, расположенного на о. Матуа, относящегося к гряде Курильских островов. За неделю наблюдалось 11 гигантских взрывов, при этом столбы пепла поднимались на высоты от 13 до 16 км. Появление образовавшихся в стратосфере аэрозольных слоев от указанных вулканов неоднократно регистрировалось над Томском. В статье анализируются особенности структуры и динамики переноса вулканических аэрозольных слоев.

Результаты наблюдений вулканических аэрозольных слоев

Прежде чем перейти к анализу наблюдений, поясним, что при лидарных измерениях в качестве параметра, описывающего вертикальную стратификацию аэрозоля, представлена оптическая характеристика $R(H)$ – отношение аэрозольного рассеяния (H – текущая высота). По определению, $R(H)$ – отношение суммы коэффициентов аэрозольного и молекулярного коэффициентов обратного рассеяния к молекулярному коэффициенту обратного рассеяния. Для примера: выполнение условий $R(H) = 1$ означает отсутствие на данных высотах аэрозоля, и, наоборот, там, где $R(H) \geq 1$, появляется аэрозоль. По значению $R(H)$ определяется вклад аэрозольного рассеяния в общее и косвенным путем оценивается величина аэрозольной компоненты. Приведенные ниже профили $R(H)$ (рис. 3, 5–7) рассчитаны как по суммарному за ночь сигналу (время накопления более 2 ч), так и по сериям 10-мин измерений с указанием среднеквадратического

отклонения. Пространственное разрешение варьировалось в пределах 150–300 м в зависимости от применяемого счетчика.

Первое появление аэрозольного слоя над Томском за указанный период наблюдений было зафиксировано 9 августа 2008 г. (рис. 3).

Это был четко выраженный слой с отношением рассеяния $R = 1,3$, расположенный на высоте 15 км. Предшествующее ему фоновое состояние аэрозольной структуры в нижней стратосфере за 5 августа показано на рис. 3. Слабый слой регистрировался 16 августа с заметно меньшим значением $R = 1,1$. Второго сентября произошло перераспределение структуры вулканического аэрозоля в двухслойную с заметным возрастанием интенсивности верхнего слоя до $R = 1,9$ и его вертикальным сдвигом на высоту $H = 16$ км и появлением второго слоя с $R = 1,4$ на $H = 11,5$ км. Двухслойная структура наблюдалась и 4 октября, но со значительным ослаблением плотности верхнего слоя и поднятием нижнего до высоты 15 км. Далее 10 октября произошла трансформация распределения аэрозоля и появился один слой с максимальным значением $R = 1,3$ на высоте 15 км. Этот слой выделялся на фоне аэрозольного наполнения нижней стратосферы за счет усиления тропосферно-стратосферного обмена, характерного для региона Западной Сибири осеннего, весеннего

и особенно зимнего периодов [1–4]. Следы слоя наблюдались 10 и 11 октября. В ноябре слой исчез. Кроме отмеченных на рис. 3 дат измерений, зондирование также проводилось 22, 23, 24, 31 августа и 25 октября. В эти ночи присутствие аэрозольных вулканических слоев замечено не было. Данный факт говорит о разрывности глобального вулканического слоя, по крайней мере над Западной Сибирью.

Для выявления географии расположения источника происхождения наблюдаемых над Томском аэрозольных слоев А.А. Черемисиным и П.В. Новиковым (ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет») был проведен расчет траекторий переноса воздушных масс [9, 10]. Как показали результаты расчета, слои 9 и 16 августа 2008 г. на высоте 15 км образовались от влк. Окмок (рис. 4).

Облака аэрозоля от влк. Касаточи могли достигнуть Томска только после 28 августа 2008 г. Такие облачные образования наблюдались 2 сентября и 4 октября. Слои за вторую и третью декады октября, вероятнее всего, следует отнести к совместному вкладу извержений обоих вулканов.

Из наблюдений 2009 г. как особо интересное событие следует выделить появление в нижней стратосфере двух аэрозольных слоев, зарегистрированных на высотах 10,6 км ($R = 3$) и 11,7 км ($R = 1,2$) 3 июля (рис. 5).

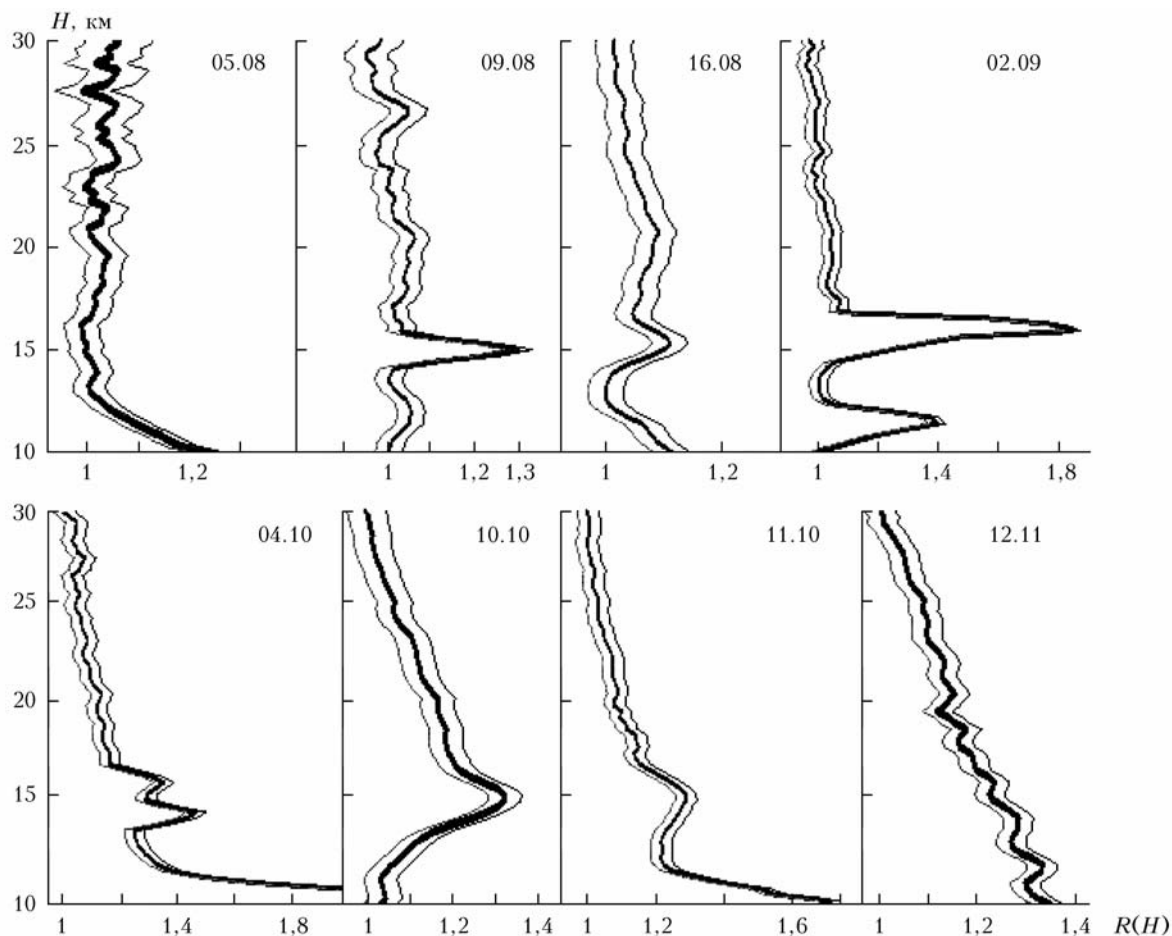
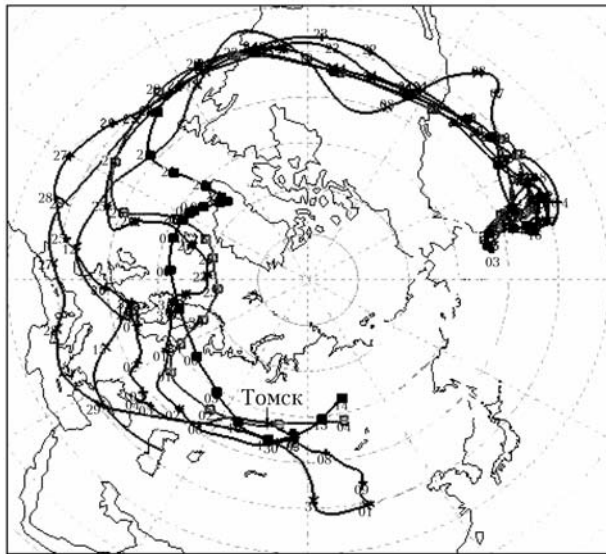
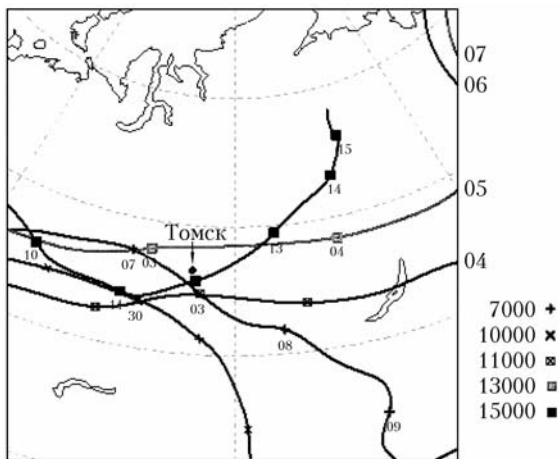


Рис. 3. Результаты наблюдений прохождения эруптивных облаков от влк. Окмок и Касаточи над Томском (2008 г.)



а



б

Рис. 4. Результаты расчета траекторий переноса воздушных масс от влк. Окмок. На кривых обозначены даты продвижения воздушных масс в июле–августе в направлении к Томску на разных высотных эшелонах от 7 до 15 км: а – вокруг полюса; б – над Сибирью. Высотные эшелоны обозначены справа на рис. б в метрах

О том, что эти слои явно не относятся к облакам верхнего яруса – циррусам, свидетельствует тот факт,

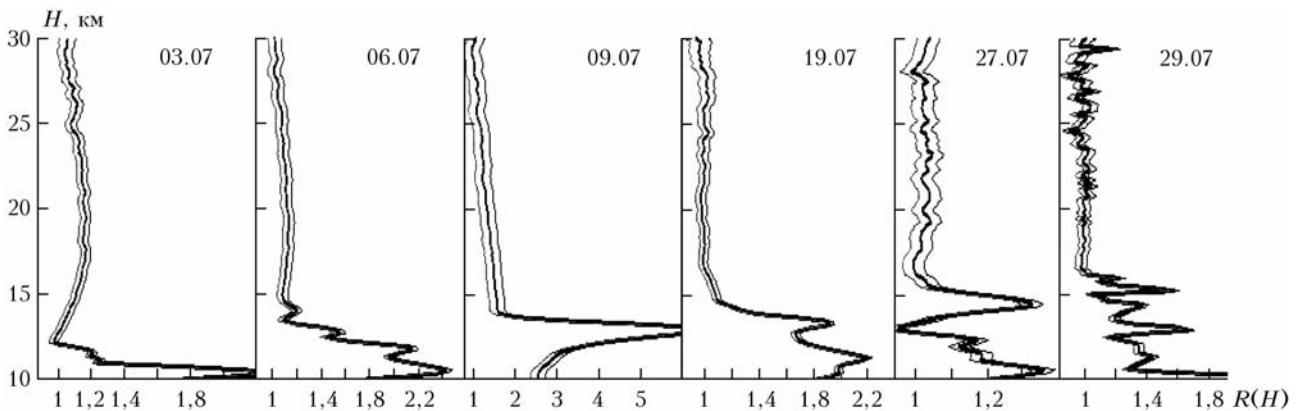


Рис. 5. Первые наблюдения аэрозольных слоев, образовавшихся в результате извержения влк. Пик Сарычева (2009 г.)

Лидарные наблюдения аэрозольных вулканических слоев в стратосфере Западной Сибири в 2008–2010 гг. 227

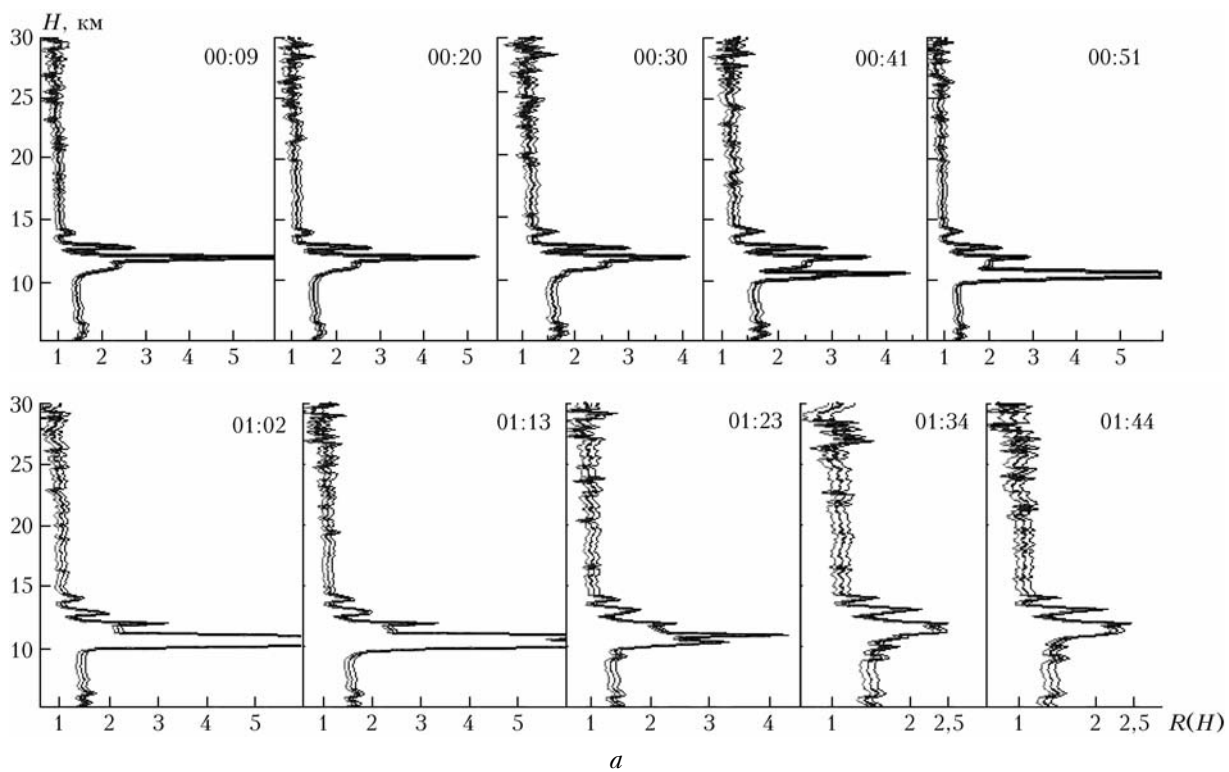
что они расположены выше среднего уровня тропопаузы на 10 км. Последний определялся по данным аэрологического зондирования двух ближайших к Томску метеостанций гг. Новосибирск и Колпашево (сайт University of Wyoming, Department of Atmospheric Science), удаленных к юго-западу и северо-западу на расстояния 210 и 230 км соответственно. Произошло это событие после длительного спокойного периода, включающего позднюю осень 2008 г. – начало лета 2009 г., и было вызвано началом извержения влк. Пик Сарычева (12 июня 2009 г.), расположенного на Курильской островной гряде. Особенностью извержения влк. Пик Сарычева являлся не единичный залповый выброс пепла и газа, а серия 11 гигантских взрывов, происходивших в течение 7 дней. В некоторых выбросах столбы пепла поднимались до высоты 13 и 16 км (<http://www.volcano.si.edu/>).

Как выяснилось далее, отмеченная особенность отразилась на формировании вулканического стратосферного облака.

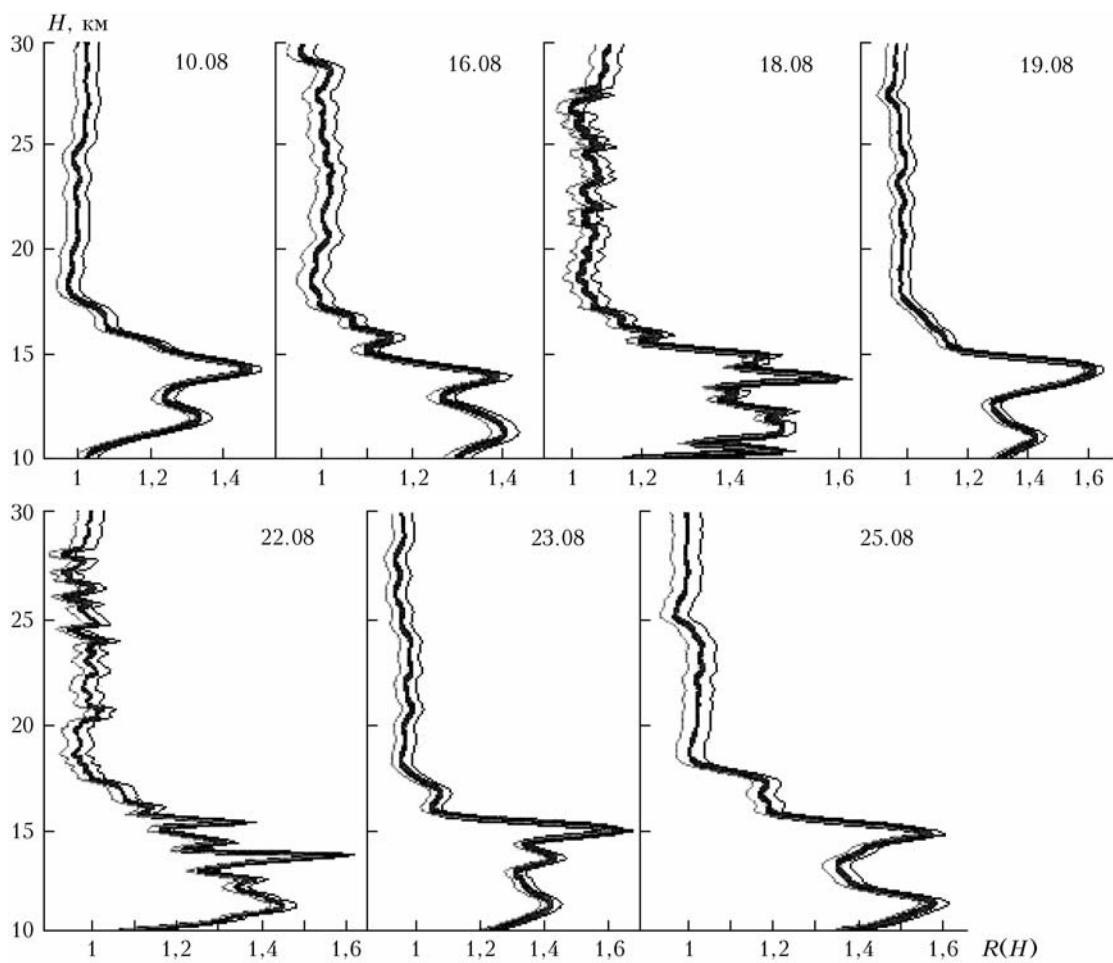
Как видно из сравнения высотного хода $R(H)$ на рис. 5, после 3 июля произошли серьезные изменения в вертикальной структуре вулканического облака. Так, 6 июля отмечаются нарастание его мощности и образование многослойной структуры с пиками отношения рассеяния 2,45; 2,2; 1,6 и 1,2 на высотах около 10,6; 11,5; 12,8 и 13,7 км соответственно. Девятого июля слоистая структура трансформируется в один мощный слой с $R = 6$, расположенный на высоте 13 км. В последующих наблюдениях с 19 июля и до конца месяца происходит возврат к слоистым образованиям от 2 до 4 слоев с заметным аэрозольным наполнением нижней стратосферы до 17 км.

На рис. 6 приведена динамика прохождения вулканического облака над Томском в ночь с 5 на 6 июля 2009 г., представленная по 10-мин накопительным интервалам.

Видна сильная изменчивость в вертикальной структуре облака. Так, за относительно небольшой промежуток наблюдений (1,5 ч) количество слоев могло меняться от трех до пяти на высотах более 10 км. В середине серии наблюдений появлялся и исчезал динамичный аэрозольный слой, величина отношения рассеяния в котором превышала 10. Подобная динамика наблюдалась и в других экспериментах. Так,



a



б

при зондировании в ночь на 19 июля отслеживалась слоистая протяженная структура в диапазоне высот от 7 до 15 км с изменяющимися по интенсивности пиками R . При этом минимальные значения R превышали единицу, что свидетельствует о неразрывности всего слоя по высоте.

Из результатов наблюдений, приведенных в августе и сентябре, следует, что вулканический слой над Томском присутствовал постоянно (рис. 6, б и в).

Он мог несколько изменяться как по структуре, так и по интенсивности. В августе этот слой имел некоторую нижнюю полочку на высоте 10 км и мог простираться до высот 17 км. Структура слоя в большинстве случаев слоистая, интенсивность невысокая – максимальное значение отношения рассеяния R не превышало 2. В сентябре такая структура про-

должала сохраняться, а мощность убывать, хотя 3 сентября (рис. 6, в) на высоте 20 км был зарегистрирован слабый, но достаточно заметный тонкий слой, который несколько раз отмечался в течение последующей недели.

Дальнейшие наблюдения в октябре (рис. 6, г) показали размывание слоистой аэрозольной структуры.

Вместе с тем отмечался монотонный рост наполнения нижней стратосферы аэрозолем до высот 30 км, подобный росту, наблюдавшемуся в 2008–2009 гг. [11]. Природа происхождения этого аэрозоля, вероятно, не может быть связана с вулканическими выбросами. Как видно из рис. 6, в, интенсивность вулканического аэрозольного слоя с конца сентября пошла на значительный спад. Аэрозольное наполнение нижней стратосферы, скорее всего, связано с выносом аэрозоля из тропосферы в стратосферу

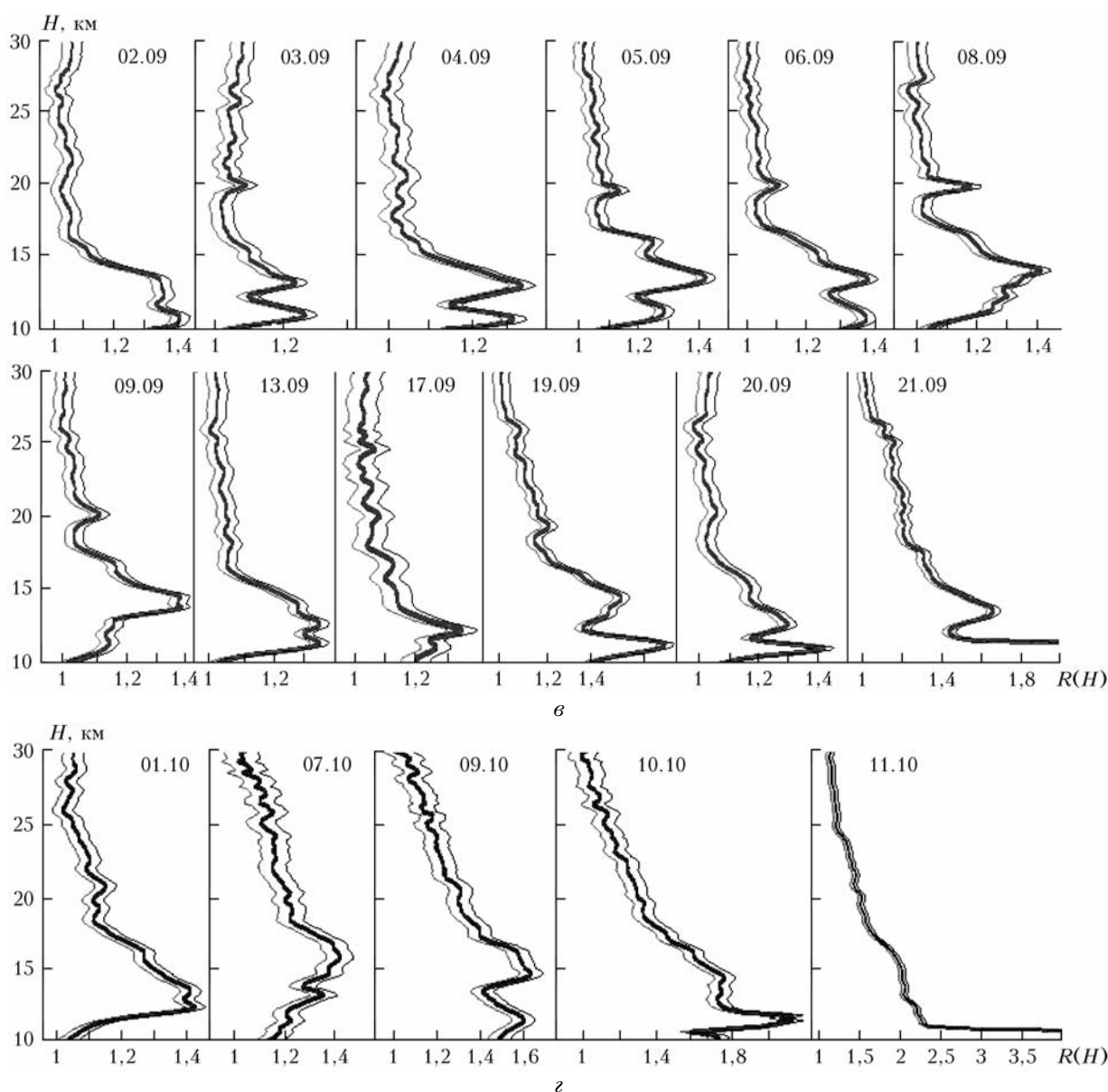


Рис. 6. Динамика прохождения вулканического облака над Томском в ночь с 5 на 6 июля 2009 г. (а), в отдельные ночи августа 2009 г. (б), в отдельные ночи сентября 2009 г. (в), октября 2009 г. (г)

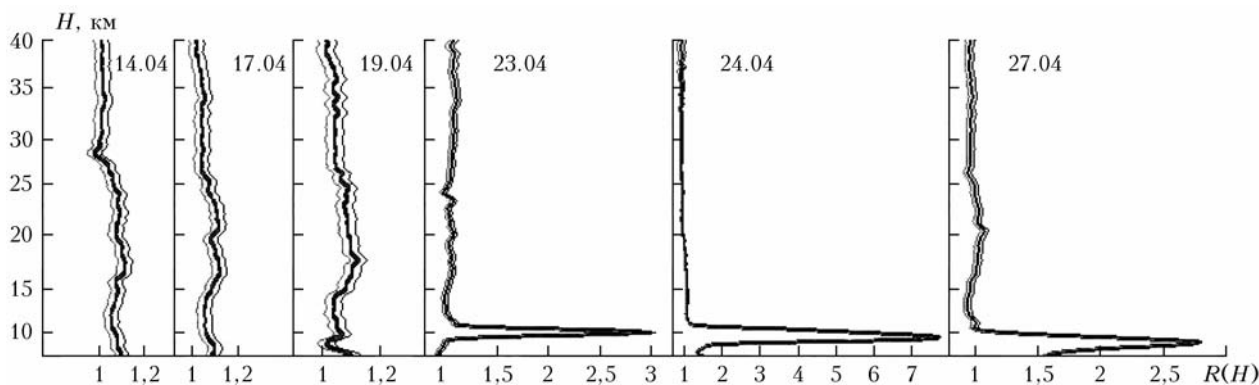


Рис. 7. Перенос эруптивного облака от влк. Эйяфьятлайокудль над Томском во второй половине апреля 2010 г.

за счет усиления тропосферно-стратосферного обмена. Аналогичные региональные особенности формирования вертикальной аэрозольной структуры в нижней стратосфере в осенний и зимний сезоны фиксировались в более ранних долговременных лидарных наблюдениях, начиная с 1986 по 2000 г., в период отсутствия вулканических извержений [1–4].

Следующий всплеск вулканической активности отмечается появлением аэрозольного слоя от извержения влк. Эйяфьятлайокудль в апреле 2010 г. (южная Исландия, рис. 7).

Несмотря на то что последствия выброса мощного столба пепла для Европы были катастрофическими с точки зрения отмены самолетных рейсов на достаточно длительный срок, при переносе над Россией вулканическое облако значительно размылось и над Томском при наблюдениях за 23, 24 и 27 апреля выглядело в виде тонкого неплотного слоя, локализованного на высоте около 9–10 км. Неординарность данного события заключалась в том, что, как правило, глобальные динамические процессы происходят в стратосфере. А в данном случае мы наблюдали вулканические слои в тропосфере ниже уровня тропопаузы.

В целом полученные результаты лидарного мониторинга аэрозоля подтверждают механизм глобального влияния вулканического выброса аэрозоля на атмосферу Земли. Несмотря на то что извержение происходило в одной точке земного шара и не относилось к типу величайших вулканических извержений (Эль-Чичон, Пинатубо), тем не менее выброшенный в стратосферу аэрозоль покрыл сплошным слоем значительную часть Северного полушария. В этом есть некоторое кратковременное сходство аэрозольных возмущений, вызванных извержениями влк. Пик Сарычева и Пинатубо, неразрывный эруптивный слой от которого просуществовал в стратосфере Северного полушария около 4 лет [5, 6, 12]. Наблюдаемые в 2008 г. слои аэрозоля, образовавшегося в результате извержений влк. Окмок и Касаточи и влк. Пик Сарычева, имели разрывный характер. Формирование хотя и достаточно кратковременного (более 3 мес), но сплошного эруптивного облака от влк. Пик Сарычева следует связывать с фактом 11 произошедших мощных взрывов, доставивших большое количество аэрозольно-газовых веществ в стратосферу.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта Минобрнауки РФ АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» № 2.1.1/1333 (2011 г.), интеграционного научно-исследовательского проекта СО РАН – ДВО РАН – НАН Украины «Диагностика динамических процессов в среднеширотной и субполярной атмосфере» и гранта РФФИ № 10-05-00907-а «Выявление региональных особенностей условий формирования и механизмов образования аэрозольных слоев в стратосфере и мезосфере Северного полушария».

1. Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н. Результаты лазерного зондирования вертикальной стратификации аэрозоля над Западной Сибирью (1986–1989 гг.) // Оптика атмосфер. 1991. Т. 4, № 6. С. 631–637.
2. Ельников А.В., Зуев В.В., Копысова Т.С., Маричев В.Н. Особенности корреляционных связей стратосферного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5, № 2. С. 193–197.
3. Маричев В.Н., Богданов В.В., Живетьев И.В., Шевцов Б.М. Влияние геомагнитных возмущений на образование аэрозольных слоев в стратосфере // Геомагнетизм и аэрон. 2004. Т. 44, № 6. С. 1–8.
4. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы. Томск: ООО «Издательство «Раско»», 2002. 352 с.
5. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л., Смирнов С.В., Столярова Н.А. Результаты лидарных наблюдений аэрозоля и озона стратосферы после извержения вулкана Пинатубо // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6, № 10. С. 1224–1233.
6. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л. Следы извержения вулкана Пинатубо в стратосфере над Западной Сибирью (Томск, 56° с.ш.) // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5, № 6. С. 602–604.
7. Крученицкий Г.М., Маричев В.Н. Влияние глобальных геофизических процессов на изменчивость вертикального распределения озона, температуры и аэрозоля над Западной Сибирью // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 4. С. 294–298.
8. Marichev V.N., Samokhvalov I.V., Kusmenkov D.O. The opening of lidar observations of the vertical stratification of aerosol and vertical temperature distribution in the stratosphere above Tomsk in the small station of high-altitude atmospheric sounding // XV Int. Sympos. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics»: Abstracts. Krasnoyarsk. 22–28 June 2008. P. 179.

9. Черемисин А.А., Кушнарченко А.В., Маричев В.Н., Николашкин С.В. Метеоперенос и полярные стратосферные облака над г. Якутском зимой 2004–2005 гг. // Метеорол. и гидрол. 2007. № 3. С. 43–53.
10. Черемисин А.А., Маричев В.Н., Новиков П.В., Кузьменков Д.О. Лидарные наблюдения стратосферного аэрозоля вулканического происхождения // Сб. трудов 16-го Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. С. 442.
11. Маричев В.Н. Лидарные исследования вертикальной структуры аэрозоля в верхней тропосфере и стратосфере над Томском в 2008–2009 гг. // Сб. трудов 16-го Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. С. 626–629.
12. Зуев В.В., Зуев В.Е., Маричев В.Н. Наблюдение стратосферного аэрозольного слоя после извержения вулкана Пинатубо на сети лидарных станций // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 10. С. 1180–1201.

V.N. Marichev, I.V. Samokhvalov. Lidar observations of aerosol volcanic layers in stratosphere of Western Siberia in 2008–2010.

The basic results on lidar sounding of the vertical aerosol structure in the upper troposphere and stratospheric over Tomsk for the period 2008–2009 are given. Results of modernized lidar complex are shown. The observations of volcanic and background aerosol, executed by the modern lidar complex are presented. Seasonal features of aerosol stratification in the upper troposphere and a stratosphere over Tomsk, revealed earlier, are confirmed. Dynamics of transfer of the eruptive aerosol from volcanic eruptions in islands of Aleutian and Kuril chains is traced over Western Siberia. Isolated cases of the appearance of an aerosol layer in the troposphere from Euyafyatlayokudl are also reported.