

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

**Результаты совместных лидарных наблюдений
аэрозольных возмущений стратосферы
на станциях сети CIS-LiNet в 2008 г.**

**В.В. Зуев¹, Ю.С. Балин¹, О.А. Букин³, В.Д. Бурлаков¹,
С.И. Долгий¹, В.П. Кабашников², А.В. Невзоров¹, Ф.П. Осипенко²,
А.Н. Павлов³, И.Э. Пеннер¹, С.В. Самойлова¹, С.Ю. Столярчук³,
А.П. Чайковский², К.А. Шмирко^{3*}**

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

²Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68, Беларусь

³Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, Россия

Поступила в редакцию 2.12.2008 г.

Приведены результаты лидарных наблюдений стратосферных аэрозольных возмущений за период июль–ноябрь 2008 г., полученные на трех лидарных станциях сети CIS-LiNet в Томске, Минске и Владивостоке, а также в пустыне Гоби во время экспедиционных измерений. Анализируются стратосферные профили отношения рассеяния $R(H)$ (отношения суммарного коэффициента аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния к коэффициенту молекулярного обратного рассеяния) на разных длинах волн, характеризующие аэрозольную стратификацию в стратосфере. Проводится анализ переноса воздушных масс в стратосфере методом прямых и обратных траекторий с помощью NOAA HYSPLIT MODEL. Показано, что стратосферные аэрозольные возмущения связаны с взрывными извержениями вулканов Алеутских островов Окмок (53,4° с.ш., 168,1° з.д. 12 июля 2008 г.) и Касаточи (52,2° с.ш., 175,5° з.д. 6–8 августа 2008 г.).

Ключевые слова: стратосфера, вулканический аэрозоль, лидар.

Введение

Евразийская лидарная сеть стран СНГ CIS-LiNet была создана 4 года назад путем объединения лидарных станций в Москве, Сургуте, Томске и Владивостоке (Россия), Минске (Беларусь) и Теплоключенке (Кыргызстан) [1]. Регулярный режим сетевых лидарных наблюдений стратосферы над большой территорией Евразии позволяет оценивать ее состояние практически для всего среднеширотного пояса Северного полушария.

* Владимир Владимирович Зуев (ref_zuev@iao.ru); Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Олег Алексеевич Букин (o_bukin@mail.ru); Владимир Дмитриевич Бурлаков (burakov@iao.ru); Сергей Иванович Долгий (dolgii@iao.ru); Виталий Павлович Кабашников (us212@rad.by.mecom.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru); Федор Петрович Осипенко; Андрей Николаевич Павлов (anpravlov@iasr.dvo.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru); Светлана Викторовна Самойлова (ssv@seversk.tomsknet.ru); Сергей Юрьевич Столярчук; Анатолий Павлович Чайковский (chaikov@dragon.bas-net.by); Константин Александрович Шмирко (shmirko.konstantin@gmail.ru).

Сохраняющееся с 1997 г. фоновое состояние стратосферы в условиях длительного вулканически спокойного периода за последние два года нарушалось дважды. С ноября 2006 по апрель 2007 г. наблюдались аэрозольные возмущения, связанные с извержением тропического влк. Рабаул (о. Новая Гвинея, октябрь 2006 г.) [2]. В настоящее время в сети CIS-LiNet вновь регистрируются возмущения, проявившиеся в августе 2008 г. Анализ информации о вулканической активности в этот период, в частности на сайте <http://www.avo.alaska.edu/>, позволил выделить извержения двух вулканов, выбросивших продукты извержения выше тропопаузы: Окмок (высота выброса 12 июля выше 15 км) и Касаточи (высота выброса 8 августа до 15 км). Оба вулкана находятся в гряде Алеутских островов. Окмок (высота 1073 м) с координатами 53,38° с.ш. и 168,17° з.д. расположен на о. Умнак. Вулкан Касаточи (314 м) с координатами 52,17° с.ш. и 175,5° з.д. находится на одном из малых необитаемых островов.

В настоящей статье анализируются стратосферные профили отношения рассеяния $R(H)$ (отношения суммарного коэффициента аэрозольного

и молекулярного обратного рассеяния к коэффициенту молекулярного обратного рассеяния) на разных длинах волн, характеризующие аэрозольную стратификацию в стратосфере, за период июль–ноябрь 2008 г. Эти профили зарегистрированы на трех лидарных станциях сети CIS-LiNet в Томске, Минске и Владивостоке, а также в пустыне Гоби во время экспедиционных измерений. Для траекторного анализа переноса воздушных масс в стратосфере использовались ресурсы, представленные на сайте <http://www.ready.noaa.gov/>.

1. Аппаратура и методики измерений

Зондирование стратосферного аэрозольного слоя осуществляется лидарами сети CIS-LiNet в спектральном диапазоне 353–1064 нм. Подробное описание аппаратуры, методик и режимов лидарных измерений приведено в [1]. В представляемых результатах совместных наблюдений использовались технические возможности следующих лидаров.

Стационарный лидар ИОА СО РАН в Томске (56,48° с.ш., 85,05° в.д.). Зондирование осуществляется на трех длинах волн: 355, 532 и 683 нм. Две первые длины волн — это линии излучения 3-й и 2-й гармоник Nd:YAG-лазера. Третья (683 нм) — 1-я стоксова компонента комбинационного смещения частоты излучения линии 532 нм в ячейке с водородом высокого давления на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Энергия импульсов излучения 25, 70 и 25 мДж соответственно при частоте следования 20 Гц. Диаметр приемного зеркала 0,3 м. Регистрация осуществляется в режиме счета импульсов фототока в течение 20 мин, потолок зондирования 40 км.

Мобильный лидар ИОА СО РАН «ЛОЗА-М2» (использовался в экспедиционных измерениях в июле–августе в пустыне Гоби в окрестностях г. Сайншанд — 44,88° с.ш., 110,12° в.д.). Зондирование осуществляется на двух длинах волн — 1064 (основная частота) и 532 нм (2-я гармоника) излучения Nd:YAG-лазера с энергией импульсов излучения 200 и 120 мДж соответственно при частоте следования 20 Гц. Диаметр приемного зеркала 0,3 м. В дневное время регистрация сигналов до высот 10–12 км проводится только в аналоговом режиме. В ночное время осуществляется одновременная запись лидарных откликов в режиме счета импульсов фототока на длинах волн 532 и 607 нм. Отклик на 607 нм представляет собой сигнал комбинационного рассеяния на молекулах азота. Длительность реализации счетно-фотонного режима составляет 30 мин, потолок зондирования сигналов упругого рассеяния достигает 30 км.

Стационарный лидар ИФ НАНБ в Минске (53,92° с.ш., 27,6° в.д.). Зондирование проводится на длинах волн 355, 532 и 1064 нм излучения Nd:YAG-лазера с энергией импульсов излучения 25, 120 и 200 мДж соответственно при частоте следования импульсов 20 Гц. Диаметр приемного зеркала 0,5 м. Система регистрации: аналоговый режим (тро-

посфера — нижняя стратосфера) и режим счета импульсов фототока (стратосфера).

Стационарный лидар ИАПУ ДВО РАН во Владивостоке (43,01° с.ш., 131,9° в.д.). Зондирование осуществляется на длине волны 353 нм (1-я стоксова компонента ВКР смещения частоты излучения Хе–Сi-лазера на длине волны 308 нм). Энергия импульсов излучения 80 мДж при частоте следования 50 Гц, диаметр приемного зеркала 0,6 м, регистрация лидарных сигналов в режиме счета импульсов фототока.

Переходя к описанию результатов лидарных наблюдений, следует заметить, что все стратосферные лидарные измерения могут осуществляться только в условиях отсутствия облачности нижнего и среднего ярусов. Это обуславливает некоторые временные пробелы в наблюдениях.

2. Регистрация вулканогенных возмущений стратосферного аэрозольного слоя после извержений влк. Окмок и Касаточи

На рис. 1 приведены в календарном порядке высотные профили $R(H)$, полученные с июля по ноябрь 2008 г. на ст. Томска (а), Минска (б) и Владивостока (в).

На рис. 2, а изображены профили $R(H)$, измеренные при проведении экспедиции в пустыне Гоби в последнюю декаду июля.

На рис. 1 и рис. 2, а видно, что вплоть до последней декады июля на всех точках наблюдений регистрировались фоновые значения R , не превышающие, например, характерных значений 1,15 на длине волны 532 нм.

Первые следы аэрозольного возмущения в нижней стратосфере обнаружены в экспедиционных измерениях 28 июля, проведенных посредством малогабаритного лидара «ЛОЗА-М2» (рис. 2, а). Следует отметить характерные особенности стратификации стратосферы для географического района, в котором располагался пункт наблюдений.

Согласно данным монографии [3] о глобальной циркуляции атмосферы, для этих широт характерно вертикальное перекрытие высот полярной (~ 11 км) и тропической (~ 18 км) тропопауз. В этом месте формируется высокоскоростной поток воздуха, ответственный за скоростной транспорт аэрозоля в стратосфере. Данные аэрологического зондирования, проведенного из пункта, расположенного на расстоянии ~ 120 км от лидара, подтвердили именно такое распределение высот тропопауз на 28 июля (рис. 2, б). Подобная стратификация стратосферы должна способствовать заполнению и возникновению равномерно слоистой высотной структуры распределения аэрозольных примесей в случае попадания на эти высоты продуктов извержения вулканов.

Как следует из анализа движения воздушных масс методом прямых траекторий, полученных с помощью NOAA HYSPLIT MODEL, продукты извержения

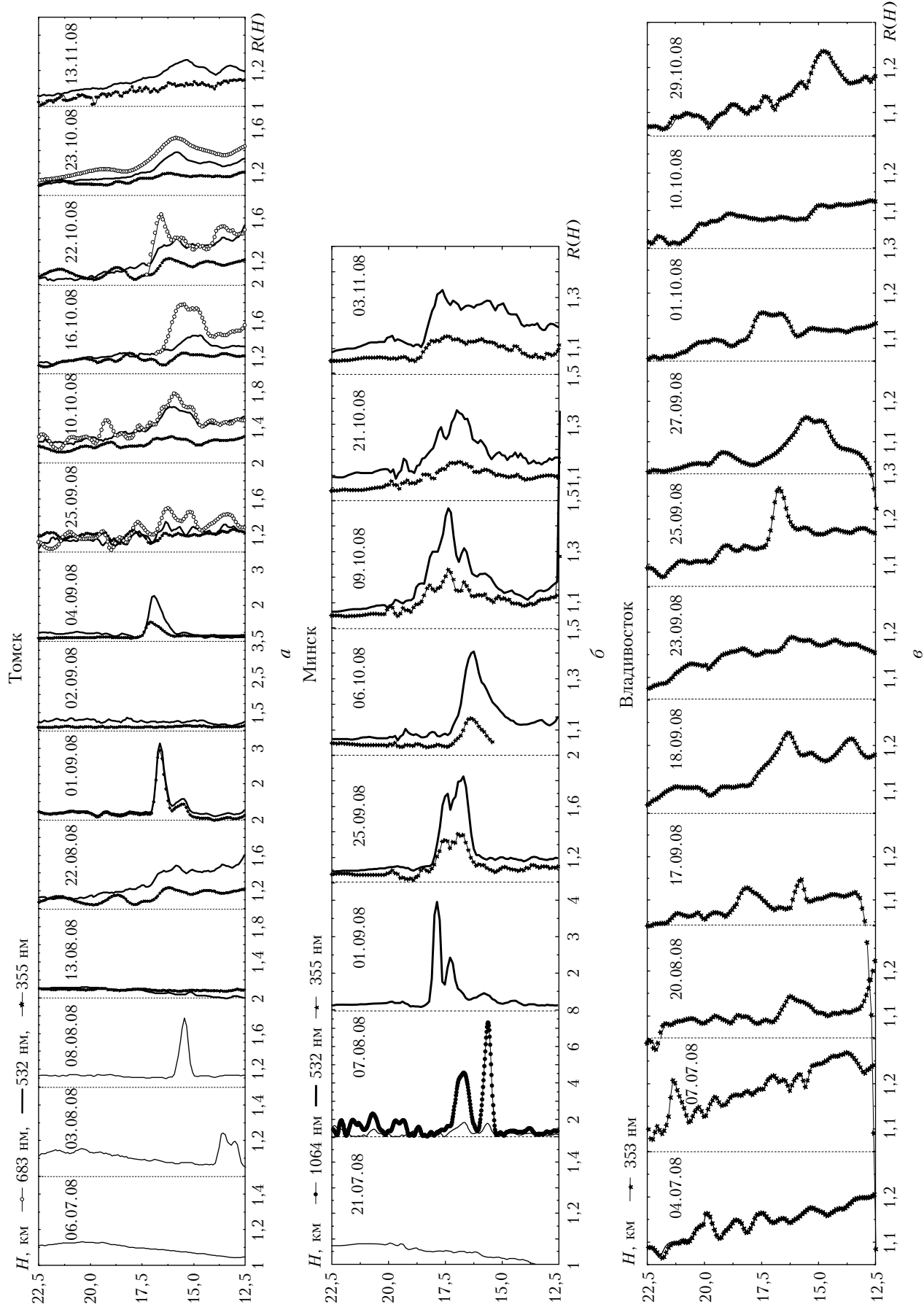


Рис. 1. Высотные профили отношения рассеяния $R(H)$ для Томска (а), Минска (б) и Владивостока (в) на разных длинах волн, зарегистрированные в июле–ноябре 2008 г.

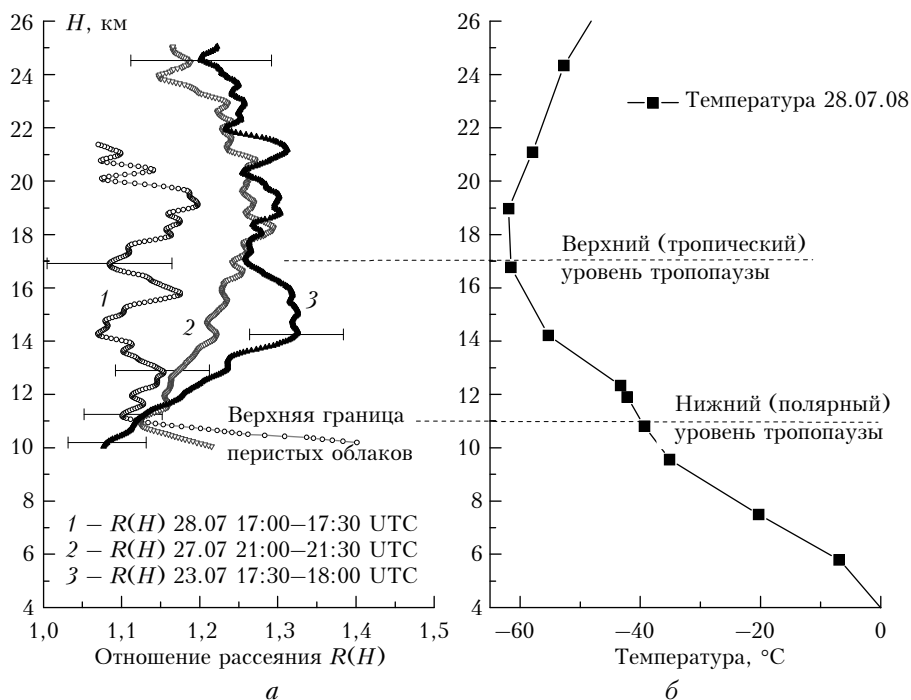


Рис. 2. Профили отношения рассеяния $R(H)$, полученные во время экспедиционных измерений в пустыне Гоби (а); профиль температуры (б)

влк. Окмок с высоты 13 км смогли достичь стратосферных высот в точке наблюдений в районе Сайншанд 28 июля 2008 г. (рис. 3). Поскольку модель предполагает возможность оценивать траекторию движения только с прогнозом на 7 дней, анализ проводился последовательно для двух временных диапазонов: 12.07÷21.07.2008 г. (рис. 3, а) и 21.07÷28.07.2008 г. (рис. 3, б). На рис. 2, а представлены два возмущенных профиля отношения рассеяния, полученные в начале (кривая 2) и конце суток (кривая 3) 28 июля. Вид этих профилей, особенно их временное различие, наглядно демонстрирует пространственно-временную структуру вулканогенных аэрозольных примесей в виде своеобразных аэрозольных «облаков», заполнивших разрывную тропопаузу на этих широтах.

Как видно на рис. 3, б, траектория движения воздушных масс с высоты 13 км над точкой извержения Окмок достигает региона Томска 26 июля. Однако неблагоприятные облачные метеоусловия не позволили зарегистрировать здесь первые возмущения стратосферы. Первые следы вулканогенного аэрозольного возмущения в стратосфере над Томском наблюдались 3 августа в виде двойного слоя на высотах от 12,5 до 14 км (см. рис. 1, а). Значение R на длине волны 532 нм достигало 1,24 на высоте 13,5 км. 8 августа в стратосфере над Томском регистрировался еще более выраженный слой на высоте 15–16 км, где значение R на длине волны 532 нм достигало 1,77 на высоте 15,4 км. Измерения 13 августа показали, что значения R над Томском вновь вернулись к фоновому уровню. Такое поведение профилей $R(H)$ типично для облачных структур.

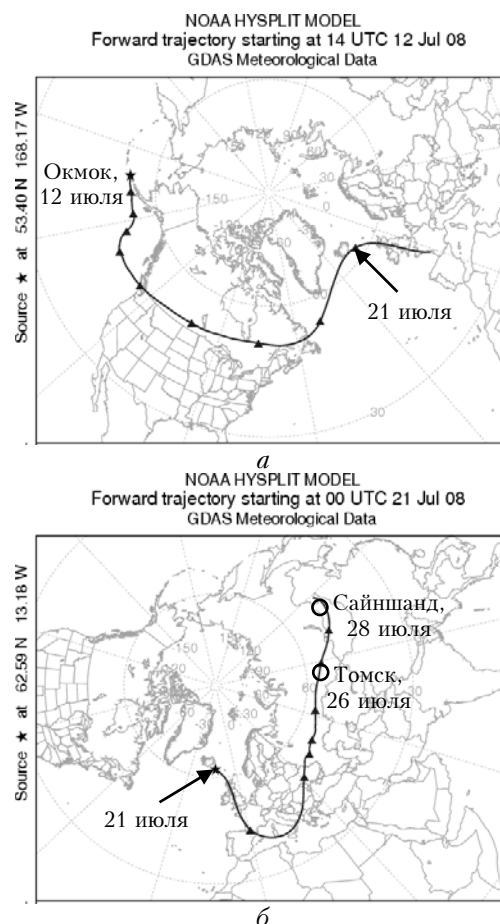


Рис. 3. Прямая траектория движения воздушных масс от влк. Окмок на момент извержения 12.07.08 в 14 UTC с высоты 13 км: а – начало, б – продолжение траектории

С конца августа до начала сентября в стратосфере над Томском наблюдалось усиление аэрозольного возмущения, произошедшее, вероятнее всего, благодаря двум эффектам: добавочной инжекции в стратосферу Северного полушария вулканогенного аэрозоля после извержения Касаточи 8 августа и генерации сернокислотного и сульфатного аэрозолей из сернистых газов, выброшенных в стратосферу влк. Ожмок 12 июля. Максимальные значения R регистрировались в Томске 1 сентября, они достигали 3,1 на длине волны 532 нм на высоте 16,5 км (см. рис. 1, *а*).

Первые следы вулканогенного аэрозольного возмущения в стратосфере над Минском наблюдались 7 августа в виде двойного слоя, особенно сильно проявившегося на длине волны 1064 нм. На этой длине волны значения R достигали 7,3 и 4,6 на высотах 14,8 и 15,7 км соответственно. При этом значение R на длине волны 532 нм на этих высотах достигало 1,7. Самые большие значения R в Минске регистрировались 1 сентября (см. рис. 1, *б*). Они достигали 4,0 на длине волны 532 нм на высоте 17,9 км. Интересно, что по форме и значениям R сдвоенные слои, зарегистрированные 1 сентября и в Томске (см. рис. 1, *а*), и в Минске (см. рис. 1, *б*), напоминают друг друга. Анализ обратных траекторий на эту дату от Минска с высоты 17,9 км (19 UTC) и Томска с высоты 16,5 км (15 UTC) показал, что они действительно пришли по разным траекториям из одного региона Алеутских островов с общим началом 10 августа с высот 17,5 и 16,9 км соответственно (рис. 4).

Лидарные наблюдения аэрозольной стратификации в стратосфере над Владивостоком осуществляются на длине волны 353 нм. Первые следы вулканогенного аэрозольного возмущения стратосферы в этой точке наблюдались 20 августа (см. рис. 1, *в*). Максимальное возмущение зарегистрировано на высоте 16,2 км 25 сентября в виде выраженного аэрозольного слоя с пиковым значением R , достигающим 1,20. Дальнейшее наблюдение за этим слоем выявило тенденцию к увеличению его вертикальной протяженности с одновременным уменьшением величины R . Об этом свидетельствуют, например, данные за 27.09.08; 01.10.08 и 29.10.08.

Географической особенностью расположения станции зондирования г. Владивостока является близость к субтропическому струйному течению, которое формирует в стратосфере канал переноса аэрозольного вещества [4]. Обратный траекторный анализ показал, что над Евразийским континентом аэрозольное вещество поставлялось в канале струйного течения. Наблюдаемое двухслойное распределение вулканогенного аэрозоля и его перераспределение (уменьшение на высоте 16,2 км и увеличение на уровне 11–12 км) могут быть связаны с существованием вращения струйного течения относительно своей оси.

Поскольку лидарные наблюдения и в Томске, и в Минске проводятся на нескольких длинах волн, имеется возможность сопоставления данных зондирования стратосферы в этих точках на длине волны 355 нм с данными для Владивостока. В частности, рассмотрены подобные профили $R(H)$, полученные

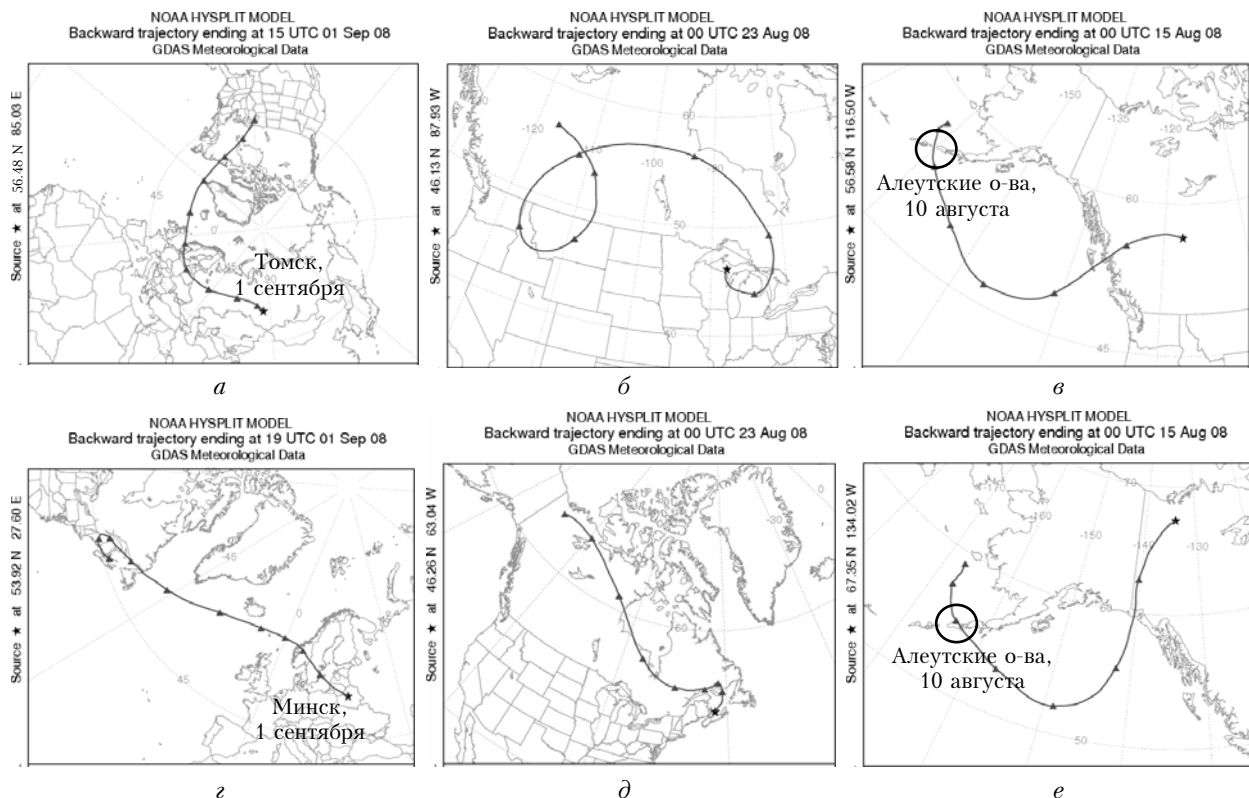


Рис. 4. Обратные траектории движения воздушных масс от Томска с высоты 16,5 км на момент 15 UTC (*а–в*) и Минска с высоты 17,9 км на момент 19 UTC (*г–е*) от 01.09.08

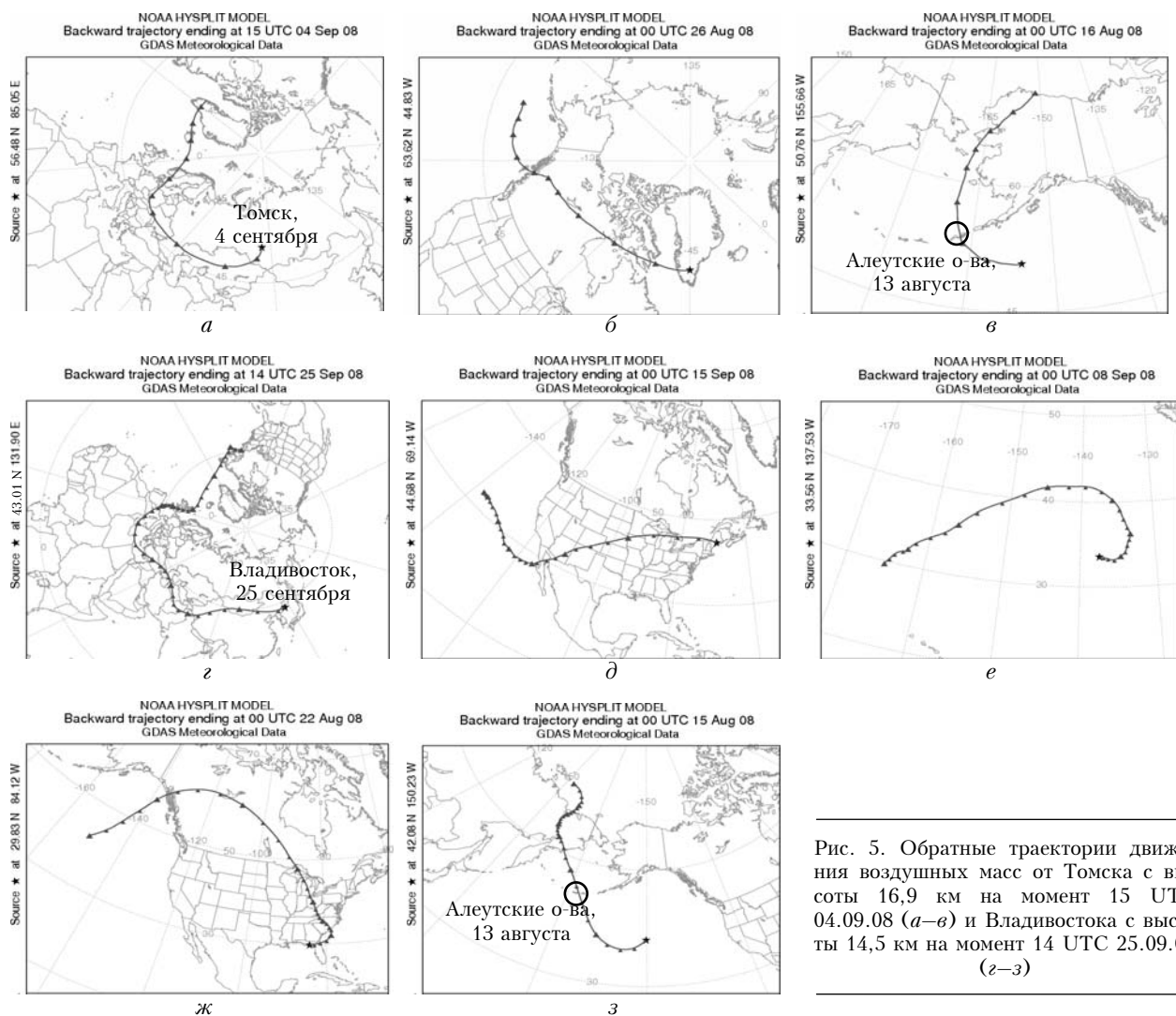


Рис. 5. Обратные траектории движения воздушных масс от Томска с высоты 16,9 км на момент 15 UTC 04.09.08 (а–в) и Владивостока с высоты 14,5 км на момент 14 UTC 25.09.08 (з–з)

в УФ-диапазоне спектра в Томске 4 сентября (см. рис. 1, а) и Владивостоке 25 сентября (см. рис. 1, в). Анализ обратных траекторий от Томска (04.09.08) с высоты 16,9 км (15 UTC) и Владивостока (25.09.08) с высоты 14,5 км (14 UTC) показал, что они действительно пришли по разным траекториям из одного региона Алеутских островов с общим началом 13 августа с высот 16,5 и 15,5 км соответственно (рис. 5).

На рис. 1 видна морфологическая общность структур вулканогенных аэрозольных слоев во всех трех точках наблюдений. Наиболее типичны случаи выраженного двойного и одинарного слоя. Двойные слои наблюдались в Томске (3 августа, 1 и 25 сентября, 10 и 16 октября), Минске (1 и 25 сентября, 21 октября) и Владивостоке (20 августа, 23 и 27 сентября, 1 октября). Одинарный слой регистрировался в Томске (8 августа и 4 сентября), Минске (7 августа и 6 октября) и Владивостоке (25 сентября). В отличие от Томска и Минска, во Владивостоке чаще наблюдались обе формы аэрозольных слоев на разных высотах (например, 17 сентября).

Данные лидарных наблюдений во всех трех рассматриваемых пунктах сети CIS-LiNet в октяб-

ре–ноябре показывают общую картину сохраняющегося аэрозольного возмущения среднеширотной стратосферы Северного полушария с постепенным размытием и оседанием вулканогенного слоя (см. рис. 1). Она характеризует генерацию и устаревание сернокислотного и сульфатного аэрозолей, турбулентное перемешивание и седиментацию вулканогенного аэрозоля.

Заключение

После относительно долгого перерыва вулканической активности, наступившего после мощнейшего в XX в. извержения влк. Пинатубо в июне 1991 г., вновь набирают силу вулканы взрывного типа, способные забросить продукты извержения в стратосферу, где они сохраняются длительное время. Совместные лидарные наблюдения, проводимые на станциях сети CIS-LiNet, и анализ траекторных расчетов с помощью NOAA HYSPLIT MODEL показали, что не столь уж сильные извержения влк. Ожмок и Касаточи на Алеутских островах в июле–августе 2008 г. стали причиной длительного и заметного

возмущения стратосферы на значительных пространствах Северного полушария.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 3.1.4. Работа группы Института физики НАН Беларуси выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф07Ф-001).

1. Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С., Ельников А.В., Тулинов Г.Ф., Плюснин И.И., Букин О.А., Чен Б.Б. Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура //

Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 12. С. 1066–1072.

2. Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Аномальное рассеяние в атмосфере над Томском в осенне-зимний период 2006/07 г. // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 524–530.
3. Murgatroyd R.J. The global circulation of the atmosphere / Ed. G.A. Corby. London: Roy. Meteorol. Soc., 1970. 165 p.
4. Букин О.А., Кульчин Ю.Н., Павлов А.Н., Шмирко К.А., Столярчук С.Ю. Особенности высотного распределения озона в переходной зоне «материк–океан» по данным лидарного зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 884–889.

V.V. Zuev, Yu.S. Balin, O.A. Bukin, V.D. Burlakov, S.I. Dolgii, V.P. Kabashnikov, A.V. Nevzorov, F.P. Osipenko, A.N. Pavlov, I.E. Penner, S.V. Samoiloa, S.Yu. Stolyarchuk, A.P. Chaikovskii, K.A. Shmirko.
Results of joint observations of aerosol perturbations in the stratosphere at stations of CIS-LiNet in 2008.

We present the results of lidar observations of stratospheric aerosol perturbations for period July–November 2008, obtained at three lidar stations of the network CIS-LiNet in Tomsk, Minsk, and Vladivostok, as well as in Gobi desert during expedition measurements. We analyze the behavior of stratospheric profiles of scattering ratio $R(H)$ (ratio of the total aerosol and molecular backscattering coefficient to the molecular backscattering coefficient) at different wavelengths, characterizing the aerosol stratification in the stratosphere. Transport of air masses in the stratosphere is analyzed by the method of direct and back trajectories using the NOAA HYSPLIT MODEL. It is shown, that stratospheric aerosol perturbation are connected to explosive eruptions of volcanos of Aleutian islands Okmok (53.4 N, 168.1 W; July, 12, 2008) and Kasatochi (52.2 N, 175.5 W; August, 6–8, 2008).