

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.540.42

**Аэрозольные возмущения стратосферы после извержения
вулкана Гримсвотн (Исландия, май 2011 г.)
по данным наблюдений станций лидарной сети стран СНГ
CIS-LiNet в Минске, Томске и Владивостоке**

**С.И. Долгий¹, В.Д. Бурлаков¹, А.П. Макеев¹, А.В. Невзоров¹,
К.А. Шмирко², А.Н. Павлов², С.Ю. Столярчук², О.А. Букин⁴,
А.П. Чайковский³, Ф.П. Осипенко³, Д.А. Трифонов^{1,5*}**

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

²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, Россия

³Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68, Беларусь

⁴Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50 а, Россия

⁵Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Россия

Поступила в редакцию 13.03.2013 г.

Приводятся результаты наблюдений аэрозольных возмущений стратосферы во второй половине 2011 г., полученные на станциях лидарной сети стран СНГ CIS-LiNet в Минске (53,9° с.ш.; 27,60° в.д.), Томске (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) и Владивостоке (43,0° с.ш.; 131,90° в.д.). По данным лидарных измерений на длинах волн зондирования 353, 355 и 532 нм с июня–июля и практически до конца 2011 г. в нижней стратосфере до высот ~ 18 км наблюдалось повышенное аэрозольное содержание. Выраженный стабильный во времени аэрозольный слой наблюдался вплоть до октября 2011 г. в высотном интервале 13–17 км. Повышенное содержание аэрозоля в нижней стратосфере наблюдалось до января 2012 г. Траекторный анализ переноса воздушных масс в стратосфере по моделям NOAA HYSPLIT MODEL с привлечением данных спутника CALIPSO показывает, что причиной наблюдаемого повышенного содержания аэрозоля является перенос продуктов извержения вулкана Гримсвотн (21 мая 2011 г., Исландия: 64,4° с.ш.; 17,3° з.д.).

Ключевые слова: стратосфера, вулканогенный аэрозоль, лидар; stratosphere, volcanic aerosol, lidar.

Введение

Оптические и микроструктурные характеристики стратосферного аэрозоля (СА) в значительной степени влияют на радиационные, динамические и химические процессы в атмосфере Земли. Особенно ярко эффекты влияния СА проявляются после взрывных вулканических извержений, когда серосодержащие

продукты выбрасываются через тропопаузу непосредственно в стратосферу и образуют там в ряде фотохимических реакций серноокислотный аэрозоль, по своей массе в десятки раз превышающий массу фонового аэрозоля. В 2005 г. была создана Евразийская сеть лидарных станций стран СНГ для зондирования атмосферного озона и аэрозоля CIS-LiNet [1]. Сеть объединяет лидарные станции в Москве, Сургуте, Томске и Владивостоке (Россия), Минске (Беларусь) и Теплоключенке (Кыргызстан). На станциях сети велись наблюдения стратосферного аэрозольного слоя (САС) в период его фонового содержания в 2005–2006 гг., а также наблюдения за изменениями САС в период вулканической активности 2006–2009 гг. [2–4]. В период 2010 – первая половина 2011 г. наблюдалось фоновое состояние САС. С июня 2011 г. вновь стало фиксироваться повышенное содержание аэрозоля в стратосфере.

* Сергей Иванович Долгий (dolgii@iao.ru); Владимир Дмитриевич Бурлаков (burlakov@iao.ru); Андрей Павлович Макеев (mar@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzegov@iao.ru); Константин Александрович Шмирко (shmirko.konstantin@gmail.com); Андрей Николаевич Павлов (anpavlov@iacp.dvo.ru); Сергей Юрьевич Столярчук (systolar@mail.ru); Олег Алексеевич Букин (o_bukin@mail.ru); Анатолий Павлович Чайковский (chaikov@dragon.bas-net.by); Федор Петрович Осипенко; Дмитрий Александрович Трифонов (dmitriy.trifonov.91@mail.ru).

1. Техника и методика измерений

Лидар ИФ НАНБ, г. Минск. Зондирование осуществляется на длинах волн 355 и 532 нм Nd:YAG-лазера, энергия импульсов излучения 25 и 120 мДж соответственно при частоте следования импульсов 20 Гц. Диаметр приемного зеркала 0,5 м. Система регистрации: аналоговый режим (тропосфера – нижняя стратосфера) и режим счета импульсов фототока (стратосфера).

Лидар ИОА СО РАН, г. Томск. Зондирование осуществляется на длинах волн 355 и 532 нм, энергия импульсов генерации соответственно 35 и 80 мДж при частоте следования 20 Гц. Диаметр приемного зеркала 0,3 м. Как и в случае лидара ИФ НАНБ, измеряются оптические характеристики СА: вертикальные профили коэффициента обратного аэрозольного рассеяния и отношения рассеяния $R(H)$ (отношение суммы коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния к последнему); интегральный коэффициент обратного аэрозольного рассеяния.

Лидар ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток. Информация извлекается из данных зондирования стратосферного озона по методу дифференциального поглощения на длинах волн 308 и 353 нм. Для восстановления оптических характеристик СА используются сигналы обратного рассеяния на длине волны 353 нм. Диаметр приемного зеркала 0,6 м. Регистрация ведется на четырех каналах: два канала, на которые поступает около 10% принимаемого излучения, регистрируют сигнал в ближней зоне выше 8 км и два канала работают в дальней зоне выше 15 км. Оцифровка осуществляется счетчиком фотонов РММ-328 с пространственным разрешением 240 м по трассе зондирования. Диапазон зондирования стратосферного аэрозоля от 9000 до 40000 м.

Следует отметить, что все стратосферные лидарные наблюдения могут осуществляться только в ночное время суток и в условиях отсутствия облаков нижнего и среднего ярусов. Это обуславливает некоторые временные пробелы в наблюдениях на всех станциях.

2. Результаты измерений

Некоторые примеры результатов зондирования представлены на рис. 1 для Минска, Томска и Владивостока.

В Минске аэрозольные слои на высотах 13–18 км стали появляться в июле. В Томске в июне наблюдалось фоновое состояние СА, профиль $R(H)$ за 2 июня показан на рис. 1, б. Регистрация повышенного содержания аэрозоля в нижней стратосфере началась в августе. В июле по техническим причинам измерения на лидаре с приемным зеркалом диаметром 0,3 м, входящим в состав сети CIS-LiNet, не проводились. В то же время на лидаре ИОА СО РАН с приемным зеркалом диаметром 1 м В.Н. Маричевым в июле регистрировались аэрозольные слои на высотах 15–17 км [5]. Во Владивостоке аэрозольные слои начали появляться периодически в конце июня. В ию-

ле–октябре на всех станциях сети в целом регистрировались стабильные выраженные аэрозольные слои на высотах 13–18 км. В ноябре–декабре стратосфера постепенно возвращалась к фоновому состоянию. В Томске немного повышенное аэрозольное содержание в нижней стратосфере наблюдалось до января–февраля 2012 г.

Существует несколько подходов к определению направления и механизмов переноса вулканического аэрозоля в стратосфере. Один из них основывается на прямом моделировании движения воздушных масс, другой – на интерпретации данных наблюдений. Первый подход сопряжен с определенными трудностями, которые связаны с тем, что неопределенность в положении точки через время Δt растет и продолжает расти с увеличением Δt . Недостатки второго подхода связаны с малым количеством станций измерения. Их можно свести к минимуму, если анализировать не только результаты наземных станций лидарного зондирования (CIS-LiNet), но и привлекать данные орбитальных лидарных комплексов (спутник CALIPSO). В течение суток спутник CALIPSO совершает 16 оборотов вокруг земного шара, разбивая его на 32 сектора. Используя результаты его измерений, можно восстановить трехмерную картину распределения аэрозолей в атмосфере.

Для отслеживания траекторий переноса аэрозоля в стратосфере использовались данные лидара CALIOP со спутника CALIPSO [6], содержащие вертикальные профили оптических параметров атмосферы [7]. Для каждого вертикального профиля коэффициента обратного рассеяния рассчитывался интегральный коэффициент обратного рассеяния в диапазоне высот от 12 до 20 км. В дальнейшем данные за каждые сутки интерполировались на равномерную сетку и отображались на карте. Полученные таким образом контурные карты отражают положение и концентрацию аэрозоля в стратосфере, временной анализ которых позволяет восстановить характер и направление переноса СА.

Траекторный анализ переноса стратосферных воздушных масс по модели NOAA HYSPLIT MODEL, которая представлена на сайте [8], и анализ данных, полученных со спутника CALIPSO, позволяют связать наблюдаемые аэрозольные слои с переносом продуктов извержения влк. Гримсвотн (Исландия: 64,4° с.ш.; 17,3° з.д.). Высота выбросов продуктов извержения этого вулкана 21 мая 2011 г. достигала более 20 км с инъекцией 0,35–0,4 Мт SO_2 [9], в дальнейшем до конца мая наблюдались менее интенсивные выбросы. Отметим, что после мощнейшего в XX в. извержения влк. Пинатубо (Филиппины, июнь 1991 г.) в стратосферу было выброшено около 20 Мт SO_2 , что привело к образованию 30 Мт сернокислотного аэрозоля, который присутствовал в стратосфере 5 лет. Естественно, что извержение влк. Гримсвотн было сравнительно слабым.

На рис. 2, а (цв. вклейка) приведен пример обратной траектории движения воздушных масс в стратосфере (по модели [8]) от Томска с высоты 16,5 км, где 7 сентября наблюдался выраженный аэрозольный слой (см. рис. 1, б).

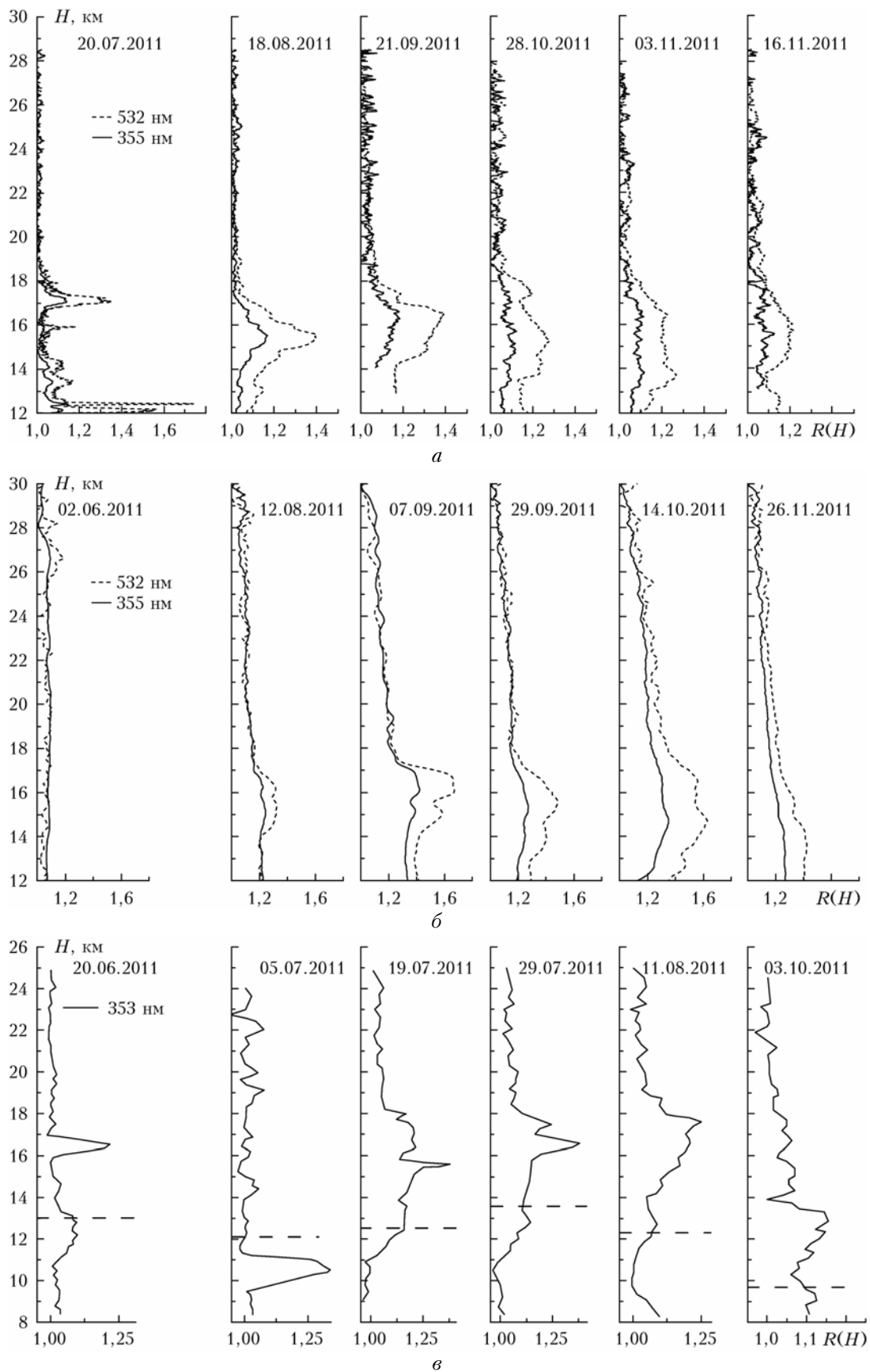
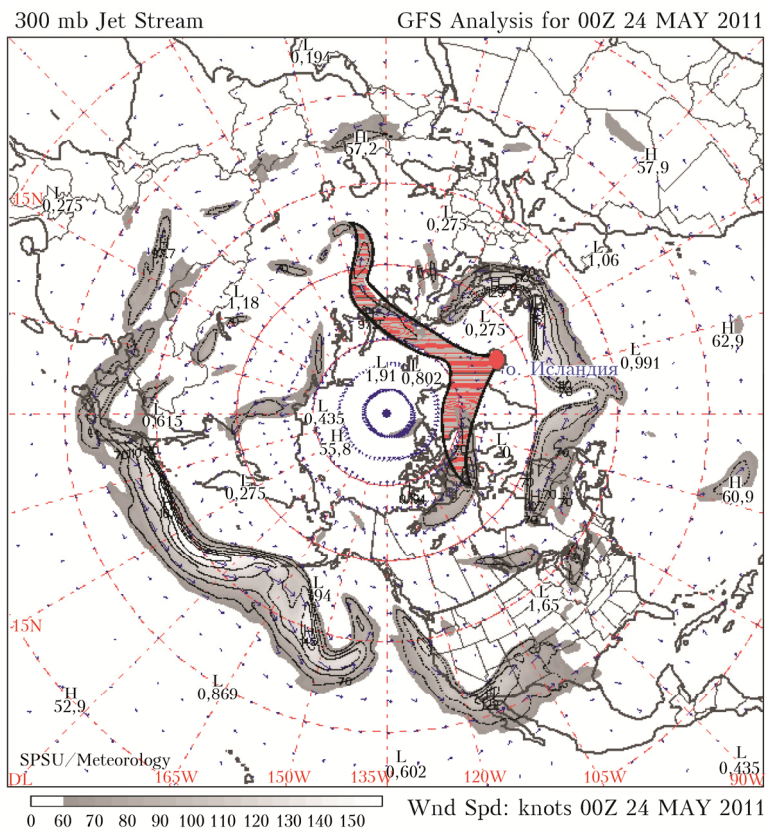


Рис. 1. Профили вертикального распределения аэрозоля в Минске (а), Томске (б) и Владивостоке (в). Горизонтальные штриховые (в) – высота тропопаузы



a



b

Рис. 2. Распространение продуктов извержения влк. Гримсвотн в мае 2011 г.: *a* – одна из возможных траекторий движения воздушных масс, объясняющая регистрацию вулканического аэрозоля в г. Томске 07.09.12 г.; *b* – горизонтальной штриховкой показано положение продуктов извержения влк. Гримсвотн 24 мая 2011 г.

Анализ траекторий показывает, что воздушные массы пришли в Томск из района Исландии, где распространялись продукты извержения влк. Гримсвотн. Траектория переноса захватывает также г. Минск.

Исследования [10, 11] показали, что в атмосфере г. Владивостока основной механизм переноса СА так или иначе связан с субтропическим струйным течением, которое представляет собой узкую область на границе стратосферы и тропосферы на широте 28–45° с.ш. с сильными (более 30 м/с) западными ветрами.

Многочисленные спутниковые измерения и модельные расчеты показывают, что аэрозольное облако от влк. Гримсвотн распространялось в северо-западном и северо-восточном направлениях таким образом, что аэрозольный шлейф с хорошей точностью проецировался на полярное струйное течение (рис. 2, б). Это дает повод предположить, что именно струйные течения явились тем механизмом, который обеспечил наиболее быстрый перенос вулканического аэрозоля в атмосфере Северного полушария. Представив графически поле ветра на высоте барической поверхности 250 мбар (рис. 3), мы обнаружили, что конфигурация струйных течений Северного полушария на момент извержения 21.05.2011, за 28.05.2011 и 01.06.2011 способствовала переносу продуктов извержения.

Траектория их движения проходила над Минском, Томском и Владивостоком, что определило принципиальную возможность регистрации продуктов извержения влк. Гримсвотн на лидарных станциях сети CIS-LiNet. Сплошными линиями отмечены наиболее вероятные траектории движения вулканического аэрозоля внутри струйных течений, пунктиром – менее вероятные траектории.

С учетом скорости ветра внутри струйных течений было получено, что первые признаки вулканического аэрозоля во Владивостоке можно было ожидать 01.06.2011, однако из-за плохих погодных условий работы по высотному зондированию атмосферы в это время не проводились. Согласно этим же расчетам для полного оборота вокруг Земли вулканическому аэрозолю требуется около 15–16 сут. Это дает возможность предположить, что природа первых следов стратосферного аэрозоля, полученных 15.06.2011 космическим лидаром CALIPSO (рис. 4, цв. вклейка), была вулканическая и соответствовала второму витку СА вокруг Земли.

Появившись 15 июня 2011 г. в стратосфере, вулканический аэрозоль находился там достаточно длительное время, и его следы обнаруживались спустя 2 мес после извержения. Восстановленное из данных CALIPSO положение аэрозольных шлейфов с хорошей точностью соответствовало струйным течениям в Северном полушарии. Распространяясь внутри струйного течения из-за разницы скоростей в разных его участках, облако вулканического аэрозоля начинает расплываться. В связи с этим можно предположить, что постоянное присутствие вулканического аэрозоля в стратосфере в период с 15 по 22 июля 2011 г. с последующим периодом его отсутствия свидетель-

Карты струйных течений Северного полушария

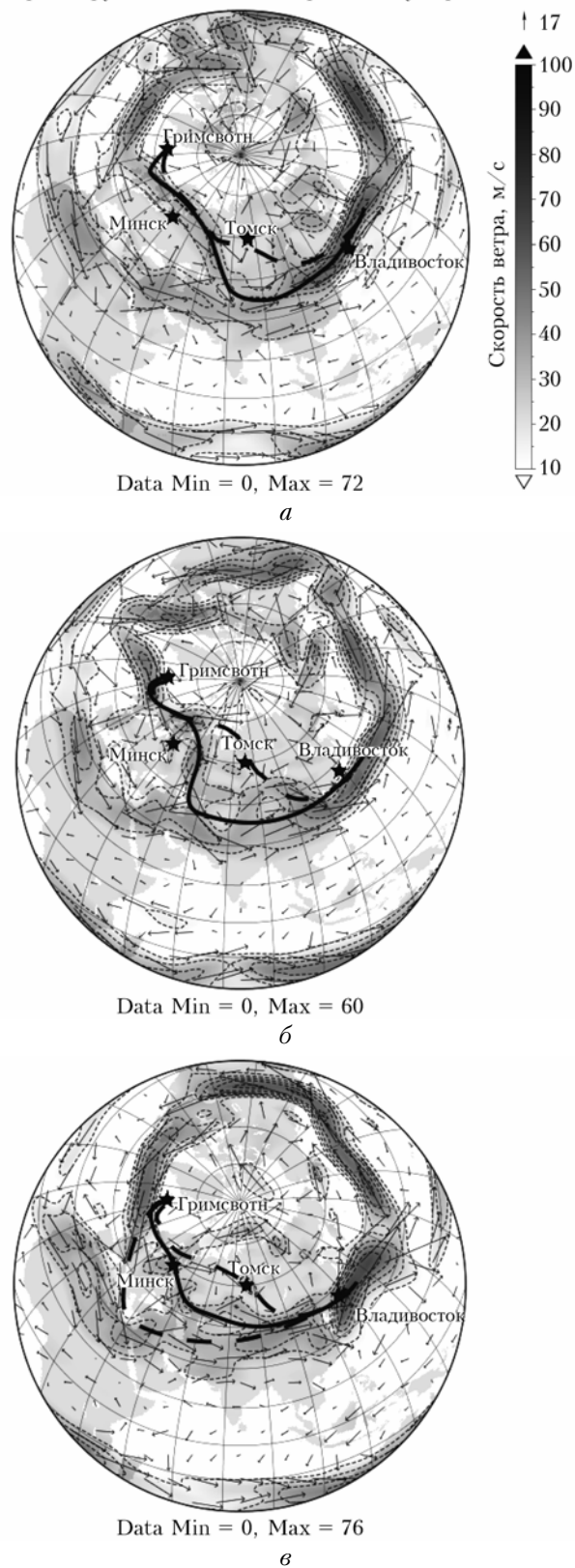


Рис. 3. Возможные траектории переноса вулканического аэрозоля в атмосфере Северного полушария: а – 21.05.2011; б – 28.05.2011; в – 01.06.2011. Сплошные линии – наиболее вероятная траектория движения, пунктирные – возможные, но менее вероятные траектории

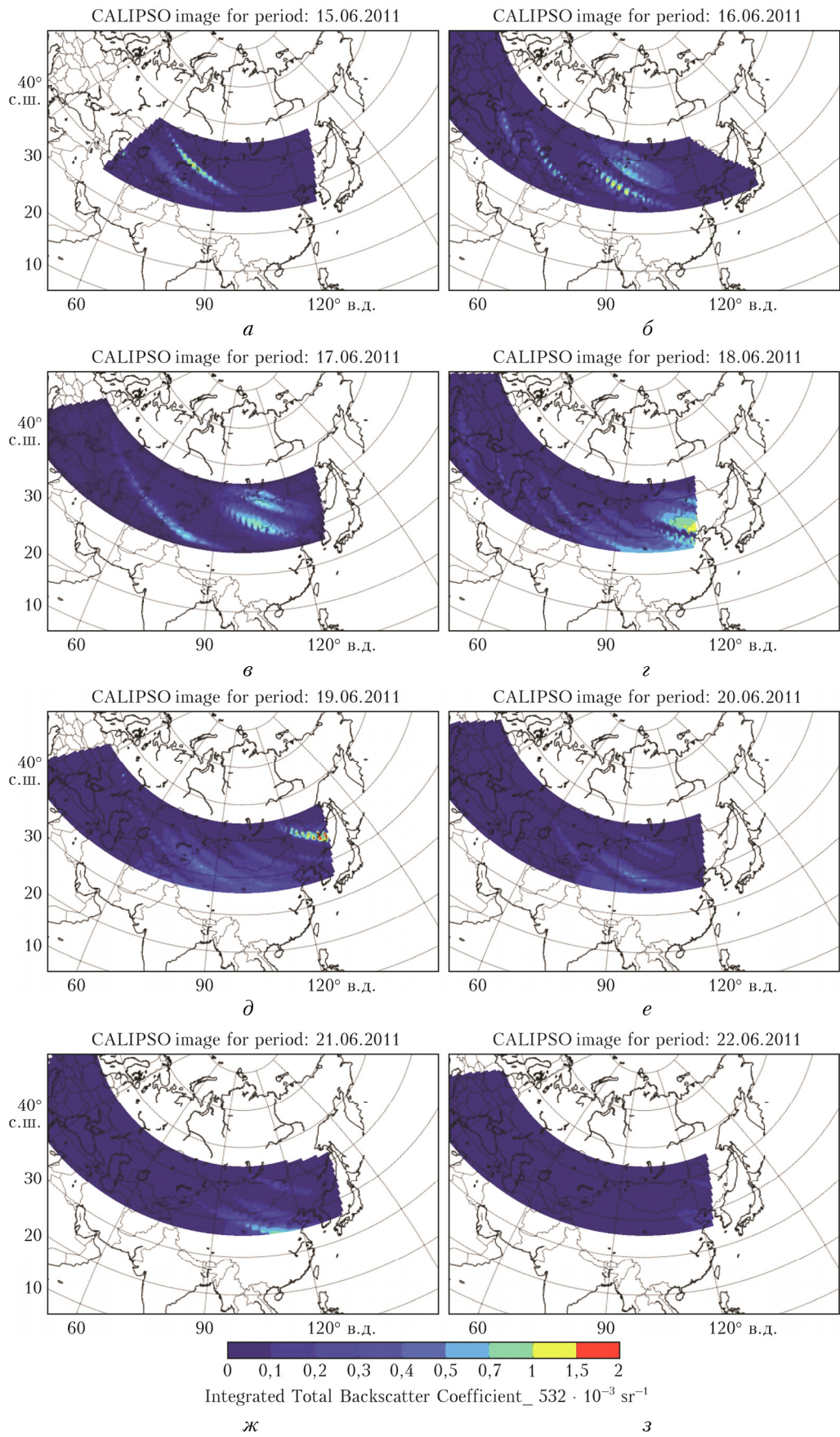


Рис. 4. Траектория движения вулканического аэрозоля по данным CALIPSO

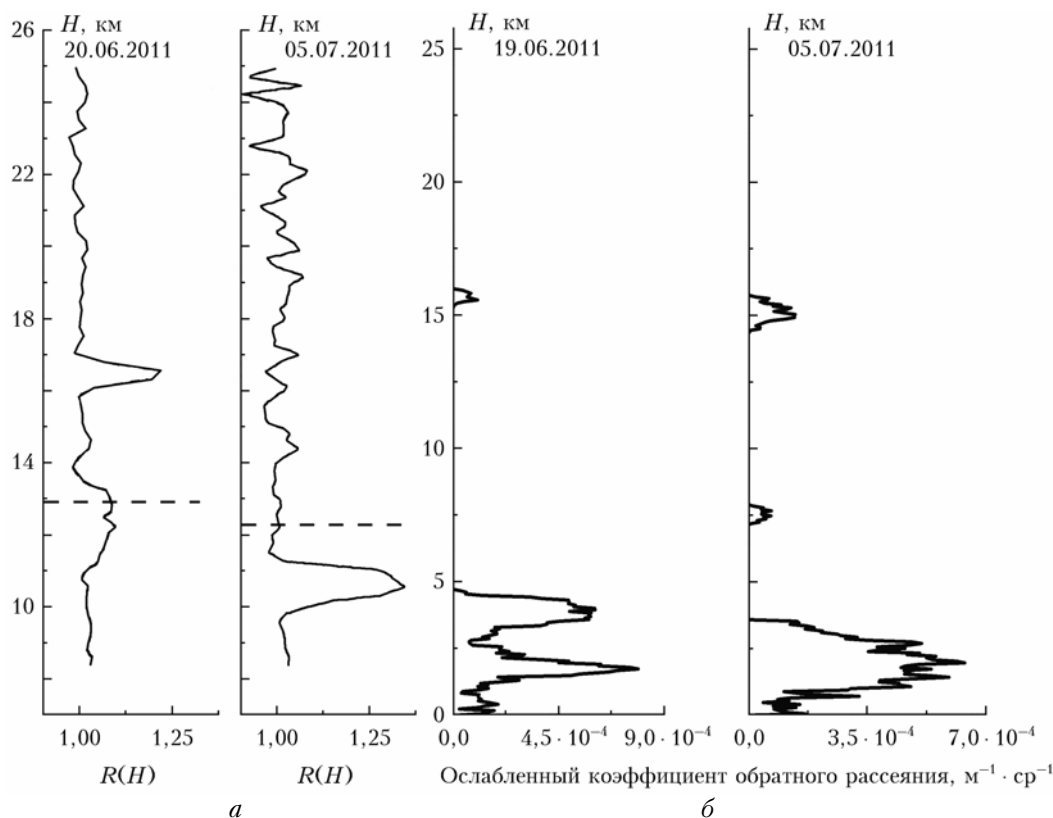


Рис. 5. Данные одновременных наземных (а) и спутниковых (б) наблюдений за стратосферным аэрозолем. Горизонтальные штриховые (а) – высота тропопаузы

ствовало о распространении продуктов извержения вдоль струйного течения примерно на 20 000 км.

Всего в мае и июне 2011 г. на лидарной станции ИАПУ ДВО РАН было проведено два измерения, совпадающие по времени и координатам (в пределах окружности радиусом 80 км и временного интервала 12 ч) с пролетом спутника CALIPSO. Регистрируемый 20.06.2011 наземным лидаром аэрозольный слой на высоте 16 км (рис. 5, а) проявляется и на спутниковых данных. Обнаруженные 05.07.2011 спутниковым лидаром слои на высотах 7,5 и 16 км не были зарегистрированы при зондировании на станции ИАПУ ДВО РАН. Это можно объяснить неравномерностью аэрозольного облака в стратосфере, т.е. наличием аэрозольного слоя на указанных высотах в рамках окна выборки профилей CALIPSO и его отсутствием над лидарной станцией.

Заключение

Данные измерений оптических характеристик стратосферного аэрозоля в период после извержения влк. Гримсвотн на сети лидарных станций стран СНГ CIS-LiNet в Минске, Томске и Владивостоке показывают глобальный характер распространения вулканогенного аэрозольного загрязнения стратосферы в Евразии от Минска до Владивостока. После сравнительно слабого извержения влк. Гримсвотн аэрозольное возмущение стратосферы наблюдалось около полугода, до конца 2011 г. В Томске незначи-

тельное аэрозольное загрязнение нижней стратосферы сохранялось еще в январе–феврале 2012 г.

Показано, что перенос вулканического аэрозоля в атмосфере Северного полушария связан со струйными течениями; на полный оборот вокруг Земли вулканическому аэрозолю требуется 15 сут; высоты регистрации вулканического аэрозоля в атмосфере г. Владивостока, полученные с наземной станции зондирования ИАПУ ДВО РАН и спутникового лидара CALIPSO, в целом совпадают.

Авторы выражают благодарность проекту CALIPSO за возможность использовать данные в наших научных исследованиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты № 11.519.11.6033, 14.518.11.7063; соглашение № 8325), проекта № 4.5 Программы Президиума РАН, грантов РФФИ (№ 11-05-98533-р_восток_а,) и БРФФИ Ф12СО–28.

1. Чайковский А.П., Иванов А.П., Балли 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., Балли Ю.С., Букин О.А., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Кабашиников В.П., Невзоров А.В., Осипенко Ф.П., Павлов А.Н., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Столярчук С.Ю., Чайковский А.П., Шмирко К.А. Результаты совместных лидарных наблюдений аэрозольных возмущений стратосферы на станциях сети CIS-LiNet в 2008 г. // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 5. С. 450–456.

3. *Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В., Самохвалов И.В., Насонов С.В., Животенюк И.В., Ельников А.В., Назаров Е.В., Плюснин И.И., Шиханцов А.М.* Следы извержения вулкана Эйяфьятлайокудль по данным лидарных наблюдений в Томске и Сургуте // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 10. С. 872–879.
4. *Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В.* Лидарные наблюдения аэрозольных возмущений стратосферы над Томском (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) в период вулканической активности 2006–2010 гг. // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 12. С. 1031–1040.
5. *Маричев В.Н.* Исследование изменчивости вертикальной структуры фонового аэрозоля в стратосфере над Томском на основе лидарных наблюдений в 2010–2011 гг. // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 11. С. 976–984.
6. *Winker D.M., Hunt W.H., McGill M.J.* Initial performance assessment of CALIOP // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L19803, doi: 10.1029/2007GL030135.
7. URL: <http://www-calipso.larc.nasa.gov/search/>
8. URL: <http://www.ready.noaa.gov>
9. *Clariss L., Hurtmans D., Clerbaux C., Hadji-Lazaro J., Ngadi Y., Coheur P.-F.* Retrieval of sulphur dioxide from the infrared atmospheric sounding interferometer (IASI) // *Atmos. Measur. Technol.* 2012. V. 5. P. 581–594, doi: 10.5194/amt-5-581-2012.
10. *Букин О.А., Ань Н.С., Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А.* Влияние струйных течений на вертикальное распределение озона и характеристики тропопаузного инверсионного слоя в Дальневосточном регионе // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2011. Т. 47, № 5. С. 660–668.
11. *Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А., Букин О.А.* Лидарные исследования изменчивости вертикального распределения озона под влиянием процессов стратосферно-тропосферного обмена в Дальневосточном регионе // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 9. С. 788–795.

S.I. Dolgii, V.D. Burlakov, A.P. Makeev, A.V. Nevzorov, K.A. Shmirko, A.N. Pavlov, S.Yu. Stolyarchuk, O.A. Bukin, A.P. Chaikovskii, F.P. Osipenko, D.A. Trifonov. **Aerosol disturbances in the stratosphere after eruption of Grimsvötn volcano (Iceland, May 2011) according to data of observations at stations of CIS lidar network CIS-LiNet in Minsk, Tomsk, and Vladivostok.**

We present the observations results of aerosol disturbances in the stratosphere in the second half of 2011; the observations were performed at stations of CIS lidar network CIS-LiNet in Minsk (53.9°N; 27.60°E), Tomsk (56.5°N; 85.0°E), and Vladivostok (43.0°N; 131.9°E). Based on the lidar measurement data at the sensing wavelengths of 353, 355, and 532 nm, an increased aerosol content was observed in the lower stratosphere up to altitudes of 18 km from June–July and practically until the end of 2011. A well-defined and temporally stable aerosol layer was observed until October 2011 in the altitude range 13–17 km. An increased aerosol content in the lower stratosphere was observed until January 2012. The trajectory analysis of air mass transport in the stratosphere on the basis of NOAA HYSPLIT MODEL with the use of CALIPSO satellite data shows that the observed increased aerosol content was due to the transport of eruption products of Grimsvötn volcano (May 21, 2011, Iceland: 64.4°N; 17.3°W).