

Сравнение результатов дистанционных спектрофотометрических и лидарных измерений O_3 , NO_2 , температуры и стратосферного аэрозоля с данными спутниковых и радиозондовых измерений

О.Е. Баженов, В.Д. Бурлаков, **М.В. Гришаев**, Ю.В. Гриднев, С.И. Долгий, А.П. Макеев, А.В. Невзоров, Н.С. Сальникова, Д.А. Трифонов, М.Ю. Аршинов, Г.А. Ивлев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 17.12.2015 г.

Рассматриваются результаты дистанционных спектрофотометрических и лидарных измерений общего содержания озона, двуокиси азота и температуры, полученные на Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск: 56,5° с.ш., 85,0° в.д.), в сравнении с результатами аналогичных спутниковых измерений.

Наземные измерения общего содержания озона осуществляются озонометром М-124, измерения содержания NO_2 выполняются автоматизированным спектрофотометром. Наземные лидарные измерения температуры — измерительным комплексом СЛС. Эти измерения сравниваются с данными радиозондовых и спутниковых измерений. Спутниковые измерения осуществляются аппаратурой TOMS и IASI.

Ключевые слова: атмосфера, спектрофотометрия, лазерное зондирование, спутниковые измерения, радиозондирование; atmosphere, spectrophotometry, laser sensing, satellite measurements, radiosonde.

Введение

Наблюдения, оценка состояния, прогноз возможных изменений и трендов аэрозольно-газового состава и метеопараметров атмосферы проводятся с применением различных наземных, радиозондовых, самолетных и спутниковых методов и средств измерений. При этом выполняются сравнения результатов измерений различными методами для определения технических возможностей методов, их валидации и верификации, т.е. для подтверждения выполнения требований к измерениям и достоверности их результатов.

На Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) в Томске (56,5° с.ш., 85,0° в.д.) ведутся наземные дистанционные измерения методами лазерного зондирования и спектрофотометрии аэро-

зольно-газового состава атмосферы и температуры. Измеряются рассеивающие характеристики стратосферного аэрозольного слоя, вертикальное распределение и общее содержание озона (ОСО), содержание двуокиси азота (NO_2), вертикальное распределение температуры от тропосферы до мезосферы. В данной статье рассматриваются некоторые результаты спектрофотометрических измерений ОСО, NO_2 и лидарных измерений температуры, полученные на СЛС, в сравнении с аналогичными результатами спутниковых и радиозондовых измерений.

Подобных сравнительных измерений выполняется довольно много для различных географических точек наблюдений ОСО, NO_2 и температуры. Представляет интерес провести сопоставление данных измерений различными методами для Сибирского региона, где до сих пор осуществлялись отдельные эпизодические сравнительные измерения отдельных параметров и составляющих атмосферы. В качестве примеров сопоставления данных по измерениям различными методами укажем работы [1–19].

Измерения ОСО

Измерения ОСО ведутся с помощью озонометра М-124 с 1993 г. Для сравнения с нашими данными использовались данные спутниковых измерений ОСО

* Олег Елисеевич Баженов (boe@iao.ru); Владимир Дмитриевич Бурлаков (burlakov@iao.ru); **Михаил Владиславович Гришаев**; Юрий Владимирович Гриднев (yugi@iao.ru); Сергей Иванович Долгий (dolgii@iao.ru); Андрей Павлович Макеев (map@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru); Наталья Сергеевна Сальникова; Дмитрий Алексеевич Трифонов; Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru).

аппаратурой TOMS, которые восстанавливаются двумя алгоритмами: OMI-TOMS и OMI-DOAS [20]. Первый алгоритм основан на версии TOMS V8. Измерения проводятся в четырех дискретных спектральных областях с центрами на 313, 318, 331 и 360 нм. Во втором алгоритме используется гиперспектральная особенность OMI (Ozone Monitoring Instrument). Он основан на принципе дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS). В восстановлении участвуют измерения в спектральном интервале 331,1–336,6 нм. Основным отличием двух алгоритмов является то, что в DOAS устраняется влияние аэрозоля, облачности, диоксида серы и подстилающей поверхности путем спектральной подгонки, а в алгоритме TOMS для этого применяется эмпирическая подгонка. Кроме того, в алгоритме TOMS используется климатология высоты облачного покрова, полученная на основе спутниковых измерений в ИК-области, а в алгоритме DOAS – информация об облачности, полученная из измерений OMI в полосе поглощения O_2-O_2 на длине волны 470 нм. Единого, устоявшегося алгоритма обработки данных спутниковых измерений пока не принято. Качественный ход долговременных изменений ОСО при использовании различных алгоритмов совпадает.

Отметим, что в марте 2013 г. по просьбе администрации сайта World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC, http://www.woudc.org/index_e.html) сотрудник Aura Validation Data Centre (AVDC) Michael Yan (michael.m.yan@nasa.gov) ввел дополнительную станцию Томск 1 с координатами 56,755° с.ш., 85,02° в.д. (координаты для станции Томск – 56,480° с.ш., 85,05° в.д.) для данных, об-

рабатываемых с помощью обоих алгоритмов. Поэтому проведем сравнение со спутниковыми данными для двух указанных географических точек. Точные координаты СЛС, Томск: 56,477974° с.ш., 85,054033° в.д.

На рис. 1 показаны ряды измерений за первую половину 2013 г., выполненных прибором М-124, и данные спутниковых измерений, обработанные алгоритмом OMI-DOAS. Для данных, обработанных алгоритмом OMI-TOMS, принято обозначение OMTO, а для данных, восстановленных с помощью алгоритма OMI-DOAS, – обозначение OMDO.

На рис. 2 сравниваются данные измерений за 2005–2013 гг. озонометром М-124 со спутниковыми данными, обработанными различными алгоритмами. Представлены относительные разности между значениями М-124 и результатами спутниковых измерений, сглаженные во временном окне 365 дней.

Спутниковые данные восстановлены с помощью двух алгоритмов для двух близлежащих географических точек: Томск (56,480° с.ш., 85,050° в.д.) – OMDO, OMTO, и Томск 1 (56,755° с.ш., 85,020° в.д.) – OMDO1, OMTO1.

Относительное расхождение между наземными и спутниковыми данными, восстановленными с помощью алгоритма OMI-DOAS, в среднем за год составило 13 е.Д. (3,5% от среднего за год) в 2010 г. и 16 е.Д. (4,7%) в 2011 г. С середины и до конца 2012 г. разногласие спутниковых и наземных измерений росло. Напомним, что 2012 г. был очень засушливым, с большим количеством пожаров в летнее время, что, по-видимому, сказалось на точности измерений. В конце 2012 г. спутниковые измерения указывали на пониженное ОСО, а наземные –

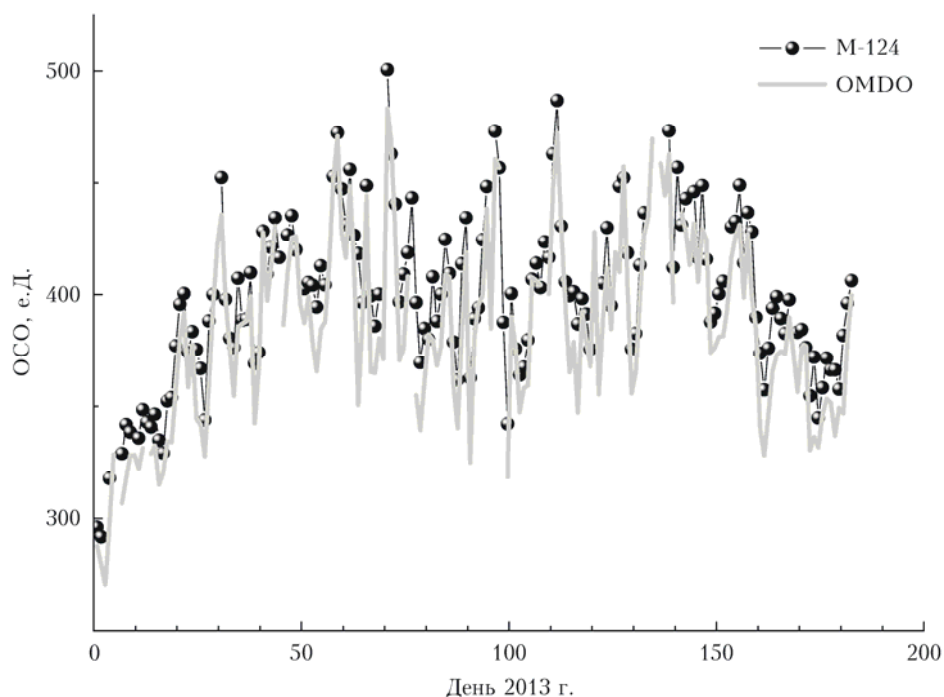


Рис. 1. Сравнение измерений ОСО с помощью озонометра М-124 и аппаратуры TOMS (спутниковые измерения восстановлены с использованием алгоритма OMI-DOAS) за первую половину 2013 г.

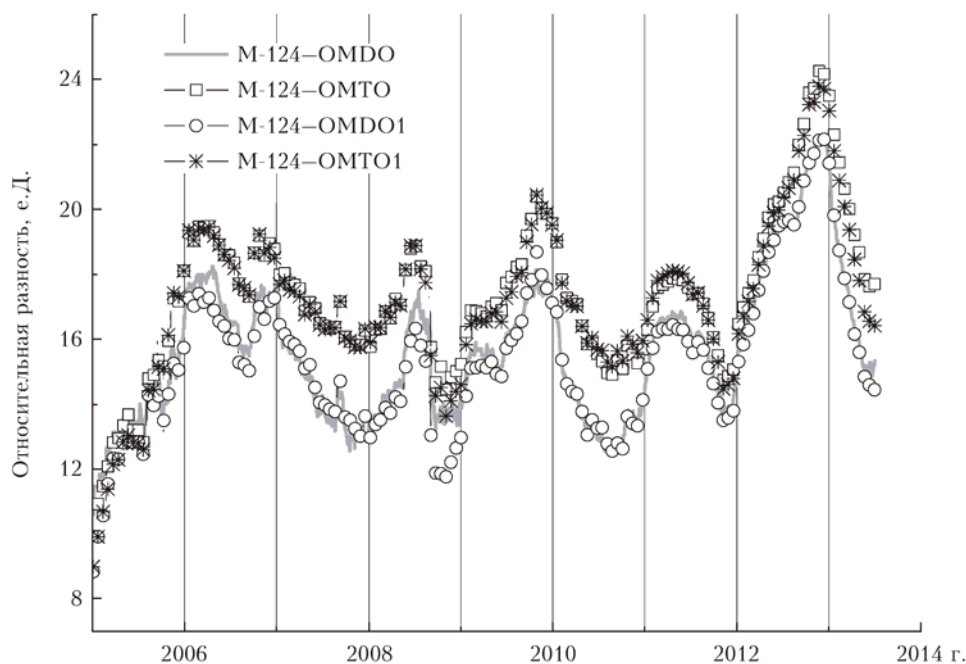


Рис. 2. Относительные расхождения между результатами измерения ОСО с помощью озонометра М-124 и аппаратуры TOMS за период 2005–2013 гг.

на обычный сезонный рост ОСО. Как следствие, расхождение составило 18 е.Д. в первой половине и 23 е.Д. во второй половине 2012 г. В 2013 г. разногласие между наземными и спутниковыми данными сократилось и составило 16 е.Д. за первую половину года.

Измерения содержания NO_2

Измерения содержания NO_2 выполняются автоматизированным спектрофотометром, который регистрирует спектр рассеянного в зените солнечного излучения в диапазоне длин волн 430–450 нм со спектральным разрешением 0,9 нм. По деформации спектра определяется содержание двуокиси азота в наклонном столбе атмосферы в зависимости от зенитного угла Солнца. Измерения проводятся в сумеречное время суток, когда солнечный зенитный угол изменяется от 83 до 96°. Из данных о наклонном содержании двуокиси азота в атмосфере путем решения обратной задачи восстанавливается вертикальное распределение двуокиси азота в десяти слоях, толщиной по 5 км каждый, в высотном диапазоне от 0 до 50 км [21]. Спутниковый прибор ОМІ для определения содержания NO_2 использует метод DOAS, регистрируя спектр рассеянной атмосферой Земли солнечной радиации в широком диапазоне длин волн в ультрафиолетовой и видимой частях спектра со спектральным разрешением 0,5 нм и пространственным разрешением $13 \times 24 \text{ км}^2$ в надире [22]. Для определения содержания NO_2 в вертикальном столбе атмосферы используется спектральный диапазон 415–465 нм. В статье рассматриваются данные ОМІ за период с октября 2004 г. по декабрь 2012 г. Для сравнения взята выборка данных измерений содер-

жания NO_2 в стратосферном столбе прибором ОМІ над Томском, находящаяся в открытом доступе на сайте Центра валидации данных Aura [23].

Поскольку наземные измерения выполняются в сумеречное время суток, они методом интерполяции были приведены ко времени измерения со спутника с учетом фотохимических процессов. Спутниковые измерения над Томском проводились дважды в день в разное время, поэтому при сопоставлении данных использовались результаты обоих измерений, а наземные измерения интерполировались к моментам измерения со спутника.

На рис. 3 представлены значения содержания NO_2 в стратосферном столбе по результатам измерений со спутника (прибор ОМІ) и наземных измерений, интерполированные ко времени наблюдения со спутника. Видно, что данные измерения со спутника (серые точки) достаточно точно совпадают с данными наземных измерений (черные точки). Временные ряды имеют годовой ход с максимальными значениями летом и минимальными зимой.

На рис. 4 представлена разность между значениями наземных измерений (черные точки) и данными спутниковых наблюдений (серые точки). Среднеквадратический разброс значений составляет $0,53 \cdot 10^{15}$ молек./см². Средняя разность имеет положительное значение и составляет $(0,19 \pm 0,01) \cdot 10^{15}$ молек./см². Значения содержания NO_2 в стратосфере по данным наземных наблюдений несколько выше значений спутниковых измерений, однако средняя разность низка и находится в пределах точности наземных и спутниковых измерений. Скользящее среднее по 30 дням (черные точки) демонстрирует выраженный сезонный ход. Коэффициент корреляции для рассматриваемого периода наблюдений составляет 0,91.

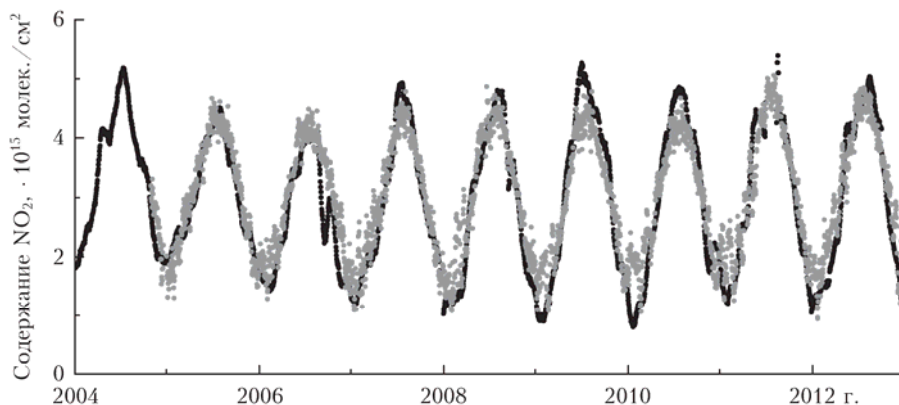


Рис. 3. Содержание NO_2 в вертикальном столбе стратосферы (10–50 км) над Томском по результатам измерений со спутника (прибор OMI) и данных наземных измерений, интерполированных ко времени наблюдения со спутника

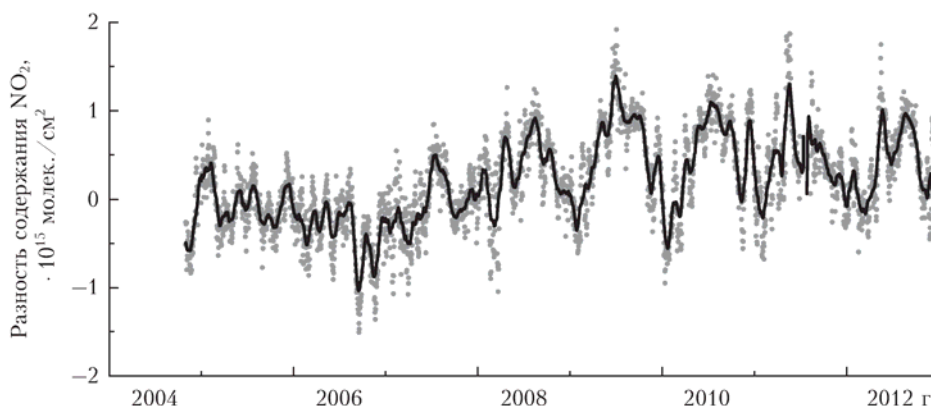


Рис. 4. Разность суточных значений содержания NO_2 в стратосфере над Томском, полученных по данным наземных и спутниковых измерений

Измерения температуры

Измерения профилей вертикального распределения температуры до мезосферных высот осуществляются лидаром измерительного комплекса СЛС [24] с использованием приемного зеркала диаметром 2,2 м. Зондирование производится на длине волны 532 нм Nd:YAG-лазера. Используется лазер модели LS-2132T фирмы LOTIS ТП (Минск). Энергия импульса излучения около 100 мДж при частоте повторения импульсов 20 Гц.

На высотах выше 30 км, где аэрозоль практически отсутствует, по крайней мере в фоновых условиях, интенсивность лидарных сигналов определяется чисто молекулярным рассеянием, что позволяет восстанавливать из этих сигналов молекулярную плотность и температуру средней атмосферы, поскольку плотность линейно зависит от температуры. Подобные измерения с использованием технических возможностей нашего лидара позволяют восстанавливать температуру вплоть до высот около 70 км.

Сигналы комбинационного рассеяния от атмосферного молекулярного азота (на длине волны 607 нм) также не имеют прямого вклада от аэрозольного рассеяния, т.е. число регистрируемых рассеянных фотонов прямо пропорционально молекулярной плотности атмосферы, что позволяет восстанавливать профили вертикального распределения температуры в нижней атмосфере.

Проводилось сравнение результатов лидарных измерений температуры с одновременными радиозондовыми измерениями в Томске и спутниковыми измерениями (IASI) на станции приема спутниковой информации ИОА СО РАН. Данные спутникового зондирования высотных профилей температуры получены из измерений гиперспектрального зондирующего аппарата IASI (спутник MetOP, ESA). На основе измерений и обработки данных прибора IASI можно получать профили температуры, влажности и содержания некоторых атмосферных газов.

Восстановление профилей температуры осуществляется на основе стандартных методик EUMETSAT и NASA [25]. Данные по одновременным лидарным, радиозондовым и спутниковым измерениям температуры представлены на рис. 5 (цв. вкладка). Для сравнения приведен модельный профиль температуры [26].

Рисунок демонстрирует практически полное совпадение профилей вертикального распределения температуры в верхней тропосфере – нижней стратосфере, полученных из данных лидарных измерений по сигналам комбинационного рассеяния от молекулярного азота на длине волны 607 нм и данных радиозонда. При этом наблюдается выраженная тропопауза на высоте около 11 км. Данные спутниковых измерений температуры тропопаузу прописывают не так четко и превышают радиозондовые. Причины этого лежат в различии как пространственного

разрешения спутниковых, лидарных и радиозондовых измерений, так и погрешностей этих измерений.

Стратосферная аэрозольная оптическая толща

После фонового состояния стратосферного аэрозольного слоя в 1996–2006 гг. происходила серия взрывных извержений вулканов, что привело к увеличению содержания стратосферного аэрозоля (СА). Хронология извержений вулканов в 2006–2011 гг., после которых над Томском регистрировалось повышенное содержание СА, представлена в таблице. Характерно, что первые пять вулканов из перечисленных в таблице относятся к поясу вулканической активности, расположенному вдоль границ Тихоокеанской литосферной плиты, так называемому Тихоокеанскому «огненному кольцу». Вероятно, что тектонические процессы одной природы вызвали вулканические извержения «огненного кольца» в 2006–2009 гг. и стали причиной трагического землетрясения и цунами на Тихоокеанском побережье Японии и других стран в марте 2011 г.

Хронология извержений всех вулканов XXI века и их мощность представлены в [27].

При анализе вероятности распространения продуктов извержения вулкана в конкретную точку наблюдений необходимо учитывать, что, как правило, продукты извержения тропического пояса распространяются со временем в атмосфере, в средних широтах — в полушарии, в котором произошло извержение, а в высоких широтах — преимущественно полярным переносом в соответствующий полярный регион. Кроме того, скорость распространения продуктов извержения от вулканов тропического пояса зависит от сезона и фазы квазидвухлетней цикличности (КДЦ) зональных ветров экваториальной

стратосферы. Перенос из тропического резервуара в средние и высокие широты усиливается в зимний период и в западной фазе КДЦ [28]. После извержения вулкана тропического пояса Рабаул (октябрь 2006 г.) быстрое, заметное в Томске увеличение аэрозольного наполнения нижней стратосферы наблюдалось уже через 10 дней и сохранялось до начала весны 2007 г. [29]. Этому способствовал и тот факт, что время извержения и последующий период характеризовались западной фазой КДЦ зонального тропического ветра.

В июле–августе 2008 г. фоновое состояние стратосферного аэрозольного слоя вновь было прервано взрывными извержениями среднеширотных вулканов Алеутских островов Окмок и Касаточи.

После извержений вулканов Окмок и Касаточи на сети лидарных станций стран СНГ по исследованиям атмосферного озона и аэрозоля (CIS-LiNet) аэрозольное возмущение стратосферы наблюдалось в пунктах измерений Минск (53,9° с.ш., 27,4° в.д.), Томск и Владивосток (43,0° с.ш., 131,9° в.д.) до конца 2008 г. Результаты этих измерений, а также экспедиционных измерений ИОА СО РАН в пустыне Гоби подробно рассматриваются совместно с траекторным анализом движения воздушных масс в [30].

Весной 2009 г. в стратосфере над Томском вновь наблюдались аэрозольные слои после серии извержений вулкана Редоубт в марте–апреле 2009 г. Регистрировалось общее увеличение аэрозольного содержания в нижней стратосфере, значения отношения рассеяния R на длине волны зондирования 532 нм увеличивались до 1,3–1,4 против 1,1–1,15 фоновых значений. При этом 6 мая 2009 г. наблюдались выраженные аэрозольные слои на высотах ~14–16 км.

В отличие от аэрозольных слоев предыдущих вулканов, которые имели прерывный характер прохождения над Томском, в августе–сентябре 2009 г. отмечалась устойчивая аэрозольная стратификация.

Хронология вулканических извержений, следы которых регистрировались в стратосфере над Томском в 2006–2013 гг.

Вулкан	Широта, град.	Долгота, град.	Дата	Период аэрозольного возмущения стратосферы
Рабаул (Папуа–Новая Гвинея)	4,3 ю.ш.	152,2 в.д.	6 октября 2006 г.	конец октября 2006 – зима 2006/07 гг.
Окмок (Алеутские острова)	53,4 с.ш.	168,1 з.д.	12 июля 2008 г.	конец июля – осень 2008 г.
Касаточи (Алеутские острова)	52,2 с.ш.	175,5 з.д.	6–8 августа 2008 г.	
Редоубт (Аляска)	60,5 с.ш.	152,7 з.д.	18 марта – 4 апреля 2009 г.	апрель–май 2009 г.
Пик Сарычева (Курильские острова)	48,1 с.ш.	153,2 в.д.	12–16 июня 2009 г.	июль–декабрь 2009 г.
Эйяфьятлайокудль (Исландия)	63,6 с.ш.	19,6 з.д.	14 апреля 2010 г.	незначительное возмущение нижней стратосферы в конце апреля 2010 г.
Гримсвотн (Исландия)	64,4 с.ш.	17,3 з.д.	21 мая 2011 г.	второе полугодие 2011 г.
Шивелуч (Камчатка)	56,6 с.ш.	161,3 з.д.	19 февраля 2013 г.	конец февраля – начало марта 2013 г.

Аэрозольные возмущения стратосферы, вызванные вулканическими извержениями 2006–2009 гг., регистрировались спутниковым лидаром CALIPSO, пунктами наблюдений Европейской лидарной сети по исследованиям аэрозоля EARLINET и другими отдельными лидарными обсерваториями [31–33].

В конце апреля 2010 г. в атмосфере над Томском наблюдались аномальные аэрозольные образования, связанные с переносом продуктов извержения вулкана Эйяфьятлайокудль (Исландия, 14 апреля 2010 г.). Первые следы извержения были зарегистрированы в тропосфере над Томском 19 апреля. Выраженные аэрозольные слои наблюдались на высоте до 10 км. В целом вулканогенный аэрозоль находился в тропосфере до конца апреля, в стратосферу проник незначительно, заметных долговременных радиационно-температурных эффектов оказать не мог. Аэрозольные возмущения тропосферы и нижней стратосферы после извержения вулкана Эйяфьятлайокудль регистрировались в Томске поляризационным лидаром Томского государственного университета и в Сургуте (61,3° с.ш., 73,4° в.д.) лидаром Сургутского государственного университета. Результаты совместных измерений ИОА СО РАН, ТГУ и СурГУ рассматриваются в [34].

Данные лидарных измерений оптических характеристик стратосферного аэрозоля 2006–2013 гг. в Томске использованы учеными США, Великобритании, Германии и Японии для анализа влияния повышенного содержания СА на радиационно-температурные изменения после серии взрывных извержений вулканов в 2006–2011 гг. [35].

При анализе использовались данные лидарных, радиозондовых, спутниковых измерений и сети AERONET. Лидары: Tsukuba (36,1° с.ш., 140,1° в.д.), Tomsk (56,5° с.ш., 85,0° в.д.), Ny Alesund (78,9° с.ш., 11,9° з.д.), Mauna Loa (19,5° с.ш., 155,6° з.д.). Спутниковые данные SAGE II, SAGE III, GOMOS. Радиозонд Lagamie (410° с.ш.). На рис. 6 (цв. вкладка) приведен пример измерений стратосферной аэрозольной оптической толщи (САОТ) различными средствами наблюдений в разных широтных поясах, в том числе в Томске. Для каждого широтного и высотного диапазона измерений наблюдается качественное совпадение результатов.

Понимание эффекта охлаждения благодаря недавним извержениям вулканов представляет особый интерес в контексте начавшегося после 2000 г. замедления глобального потепления. Спутниковые наблюдения САОТ на высотах, превышающих 15 км, показали, что слабые вулканические извержения способны оказать возмущающее действие на проходящее солнечное излучение. На основе лидарных, сетевых (AERONET) и радиозондовых наблюдений показано, что в имеющихся в настоящее время спутниковых данных не учитывается значительное количество вулканического аэрозоля, располагающегося на высотах между тропопаузой и 15 км в средних и высоких широтах, и, соответственно, занижается полный радиационный форсинг вследствие недавних извержений. С учетом этих оценок в простой климатической модели определен глобальный форсинг

вулканического аэрозоля, составивший $(-0,19 \pm 0,09)$ Вт/м⁻² за период после 2000 г. В результате получена оценка глобального похолодания, составившего 0,05–0,12 °С. Сделан вывод о том, что недавние вулканические извержения привели к более значительному похолоданию после 2000 г., чем следует из спутниковых данных, в которых не учитывается влияние вулканического аэрозоля на высотах ниже 15 км.

Заключение

При сравнении данных по ОСО лучшее согласие показывают данные измерений с помощью озонметра М-124 и данные на основе алгоритма OMDO. Как правило, измерения М-124 превышают спутниковые данные.

Сравнение наземных измерений NO₂ на СЛС со спутниковыми (аппаратура OMI) показало, что зимние значения содержания NO₂ по данным спутниковых наблюдений больше значений, получаемых из наземных наблюдений, а летние — меньше. Однако среднестатистическое расхождение значений для стратосферы небольшое и не выходит за пределы ошибок измерений.

В верхней стратосфере — мезосфере полного совпадения профилей температуры, полученных из данных спутниковых и лидарных измерений, не наблюдается. Разброс значений достигает 7–8 К, что можно объяснить погрешностью обоих приборов и пространственно-временным разнесением измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Миннауки и образования РФ (Соглашение № 14.604.21.0100).

1. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Сравнение спутниковых и наземных методов измерений общего содержания озона // Иссл. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 83–91.
2. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Шаламянский А.М. Наземные измерения общего содержания озона ИК-методом // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2011. Т. 47, № 4. С. 521–532.
3. Schneider M., Blumenstock T., Hase F., Höpfner M., Cuevas E., Redondas A., Sancho J.M. Ozone profiles and total column amounts derived at Izaca, Tenerife Island, from FTIR solar absorption spectra, and its validation by an intercomparison to ECC — sonde and Brewer spectrometer measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2005. V. 91, N 3. P. 245–274.
4. Schneider M., Redondas A., Hase F., Blumenstock T., Cuevas E., Guirado C. Comparison of groundbased Brewer and FTIR total column O₃ monitoring techniques // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8, N 18. P. 5535–5550.
5. Shavrina A.V., Pavlenko Y.V., Veles A., Symiavskiy I., Kroon M. Ozone columns obtained by ground-based remote sensing in Kiev for Aura Ozone Measuring Instrument validation // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D24S45. DOI: 10.1029/2007JD008787.
6. Antyn M., Lypez M., Cacchoro V.E., Vilaplana J.M., Toledano C., Krotkov N.A., Arola A., Serrano A., de la Morena B. Validation of OMITOMS and OMIDOAS total ozone column using five Brewer spectroradiometers at

- the Iberian peninsula // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D14307. DOI: 10.1029/2009JD012003.
7. Fioletov V.E., Labow G., Evans R., Hare E.W., Kohler U., McElroy C.T., Miyagawa K., Redondas A., Savastiouk V., Shalamyansky A.M., Staehelen J., Vaniek K., Weber M. Performance of the groundbased total ozone network assessed using satellite data // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D14313. DOI: 10.1029/2008JD009809.
 8. McDermid I.S., Godin S.M., Barnes R.A., Parsons C.L., Torres A., McCormik M.P., Chu W.P., Wang P., Butler J., Newman P., Burris J., Ferrare R., Whiteman D., McGee T.J. Comparison of ozone profiles from ground-based lidar, electrochemical concentration cell balloon sonde, ROCOZ-A rocket ozonesonde, and Stratospheric Aerosol and Gas Experiment satellite measurements // *J. Geophys. Res.* D. 1990. V. 95, N 7. P. 10037–10042. DOI: 10.1029/JD095iD07p10037.
 9. Ивлев Г.А., Белан Б.Д., Дорохов В.М., Терёб Н.В. Спектральные наблюдения изменений общего содержания озона в Обнинске и Томске // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 4. С. 325–331.
 10. Hendrick F., Pommereau J.-P., Goutail F., Evans R.D., Ionov D., Pazmino A., Kyro E., Held G., Eriksen P., Dorokhov V., Gil M., Van Roozendaal M. NDACC/SAOZ UV-visible total ozone measurements: Improved retrieval and comparison with correlative ground-based and satellite observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. N 11. P. 5975–5995. DOI: 10.5194/asp-11-5975-2011.
 11. Юшков В.А., Накане Х., Цветкова Н.Д., Ситникова В.И., Лукьянов А.Н. Исследование состояния озонового слоя в зимне-весенний период 2000 г. с помощью баллонных измерений и наземных наблюдений в Сибири // *Метеорол. и гидрол.* 2002. № 12. С. 27–35.
 12. Груздев А.Н., Елохов А.Н. Валидация результатов измерений содержания NO₂ в вертикальном столбе атмосферы с помощью прибора OMI с борта спутника EOS-Aura по данным наземных измерений на Звенигородской научной станции // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2009. Т. 45, № 4. С. 477–488.
 13. Kar J., McElroy Th.C., Drummond J.R., Zou J., Nichitiu F., Walker K.A., Randall C.E., Nowlan C.R., Dufour D.G., Boone C.D., Bernath P., Trepte C., Thomason L.W., McLinden C. Initial comparison of ozone and NO₂ profiles from ACE-MAESTRO with balloon and satellite data // *J. Geophys. Res.* D. 2007. V. 112, iss. 16. DOI: 10.1029/2006JD008242.
 14. Randall C.E., Lumpe J.D., Bevilacqua R.M., Hoppel K.W., Shettle E.P., Rusch D.W., Gordley L.L., Kreher K., Pfeilsticker K., Boesch H., Toon G.C., Goutail F., Pommereau J.P. Validation of POAM III NO₂ measurements // *J. Geophys. Res.* D. 2002. V. 107, iss. 20. P. ACH6-1–ACH6-15. DOI: 10.1029/2001JD001520.
 15. Bills R.E., Gardner C.S., Franke S.J. Na Doppler/temperature lidar: Initial mesopause region observations and comparison with the Urbana medium frequency radar // *J. Geophys. Res.* D. 1991. V. 96, N 12. P. 22701–22707.
 16. Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Гришаев М.В., Ельников А.В. Сравнительные результаты наземного космического лидарного зондирования, полученные во время синхронных измерений по программе LITE // *Оптика атмосф. и океана.* 1996. Т. 9, № 3. С. 347–350.
 17. Зуев В.В., Маричев В.Н., Долгий С.И., Шарабарин Е.В. Сравнение результатов измерения температуры в стратосфере лидаром и метеозондом в интервале высот 13–30 км // *Оптика атмосф. и океана.* 1996. Т. 9, № 10. С. 1394–1398.
 18. Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Лисенко А.А., Илюшик В.Ю., Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Рыскин В.Г., Бычков В.В. Первые результаты комплексного эксперимента по зондированию средней атмосферы в оптическом и миллиметровом диапазонах волн над г. Томском // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 12. С. 1091–1095; Marichev V.N., Matvienko G.G., Lisenko A.A., Iljushik V.Yu., Kulikov Yu.Yu., Krasilnikov A.A., Ryskin V.G., Bychkov V.V. First results of an integrated experiment on sounding the middle atmosphere in optical and millimeter wavelength ranges (over Tomsk) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 3. P. 222–226.
 19. Маричев В.Н. Анализ поведения плотности воздуха и температуры в стратосфере над Томском в периоды ее возмущенного и спокойного состояния, выполненный по результатам лидарных измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 9. С. 783–792.
 20. URL: <http://avdc.gsfc.nasa.gov/>
 21. McKenzie R.L., Johnston P.V., McElroy C.T., Kerr J.B., Solomon J.B. Altitude distributions of stratospheric constituents from ground-based measurements at twilight // *J. Geophys. Res.* D. 1991. V. 96, iss. 8. P. 15499–15511.
 22. Boersma K.F., Busela E.J., Brinkma E.J., Gleason J.F. OMI algorithm theoretical basis document. Volume IV: OMI trace gas algorithms // ATBD-OMI-02. NASA Goddard Space Flight Centre / Ed. by K. Chance. Greenbelt, Md., 2002. P. 15–36.
 23. URL: http://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03L2OVP/OMNO2/aura_omi_l2ovp_omno2_v03_tomsk.txt
 24. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Модернизация измерительного комплекса Сибирской лидарной станции // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17, № 10. С. 857–864.
 25. August T., Klaes D., Schlüssel P., Hultberg T., Crapeau M., Arriaga A., O'Carroll A., Coppens D., Munro R., Calbet X. IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2012. V. 113, iss. 11. P. 1340–1371.
 26. Ипполитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. Оптико-метеорологическая модель атмосферы для моделирования лидарных измерений и расчета распространения радиации // *Спектроскопические методы зондирования атмосферы.* Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–43.
 27. Andersson S.M., Martinsson B.G., Vernier J.-P., Friberg J., Breninkmeijer C.A., Hermann M., van Velthoven P.F., Zahn A. Significant radiative impact of volcanic aerosol in the lowermost stratosphere // *Nature Commun.* 2015. N 6. 7692 (8 p.). DOI: 10.1038/ncomms8692.
 28. Hitchman M.H., McKay M., Trepte C.R. A climatology of stratospheric aerosol // *J. Geophys. Res.* D. 1994. V. 99, N 10. P. 20689–20700.
 29. 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.
 30. Зуев В.В., Балин Ю.С., Букин О.А., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Кабашиков В.П., Невзоров А.В., Осипенко Ф.П., Павлов А.Н., Пеннер Н.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.
 31. D'Amico G., Amodeo A., Boselli A., Giunta A., Madonna F., Mona L., Pappalardo G., Haywood J., Jones A., Bellouin N., Telford P. Stratospheric aerosol layers over southern Italy during the summer of 2009: Lidar observations and model comparison // *Proc. 25th Int. Laser Radar Conf. St.-Petersburg,* 5–9 July, 2010. V. 1. P. 473–476.

32. *Trickl T., Giehl H., Jäger H., Fromm M.* 33 years of stratospheric aerosol measurements at Garmisch–Partenkirchen (1976–2010) // Proc. 25th Int. Laser Radar Conf. St.-Petersburg, 5–9 July, 2010. V. 1. P. 465–468.
33. *Mattis I., Seifert P., Müller D., Tesche M., Hiebsch A., Kanitz T., Schmidt J., Finger F., Ansmann A., Wandinger U.* Volcanic aerosol layers observed with multi-wavelength Raman lidar over Europe since summer 2008 // Proc. 25th Int. Laser Radar Conf. St.-Petersburg, 5–9 July, 2010. V. 1. P. 445–448.
34. *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 Эйяфьатлайокудль по данным лидарных наблюдений в Томске и Сургуте // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 872–879; *Burlakov V.D., Dolgii S.I., Nevzorov A.V., Samokhvalov I.V., Nasonov S.V., Zhivotenyuk I.V., Elnikov A.V., Nazarov E.V., Plusnin I.I., Shikhantsov A.M.* Traces of eruption of Eyjafjallajökull volcano according to data of lidar observations in Tomsk and Surgut // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 2. P. 110–117.
35. *Ridley D.A., Solomon S., Barnes J.E., Burlakov V.D., Deshler T., Dolgii S.I., Herber A.B., Nagai T., Neely R.R., Nevzorov A.V., Ritter C., Sakai T., Santer B.D., Sato M., Schmidt A., Uchino O., Vernier J.P.* Total volcanic stratospheric aerosol optical depths and implications for global climate change // Geophys. Res. Lett. 2014. DOI: 10.1002/2014GL061541.

O.E. Bazhenov, V.D. Burlakov, M.V. Grishaev, Yu.V. Gridnev, S.I. Dolgii, A.P. Makeev, A.V. Nevzorov, N.S. Salnikova, D.A. Trifonov, M.Yu. Arshinov, G.A. Ivlev. **Comparison of remote spectrophotometric and lidar measurements of O₃, NO₂, temperature, and stratospheric aerosol with data of satellite and radiosonde measurements.**

We consider the results of remote spectrophotometric and lidar measurements of the total ozone and nitrogen dioxide contents and temperature obtained at the Siberian Lidar Station (SLS) of V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Tomsk: 56.5°N, 85.0°E) in comparison with the results of analogous satellite measurements.

The ground-based measurements of the total ozone content are performed with the help of a M-124 ozonometer; and the measurements of the NO₂ content are carried out with an automated spectrophotometer. The ground-based lidar measurements of temperature are conducted on the basis of SLS measurement complex. These measurements are compared with data of radiosonde and satellite measurements. The satellite measurements are performed by the TOMS and IASI instrumentation.

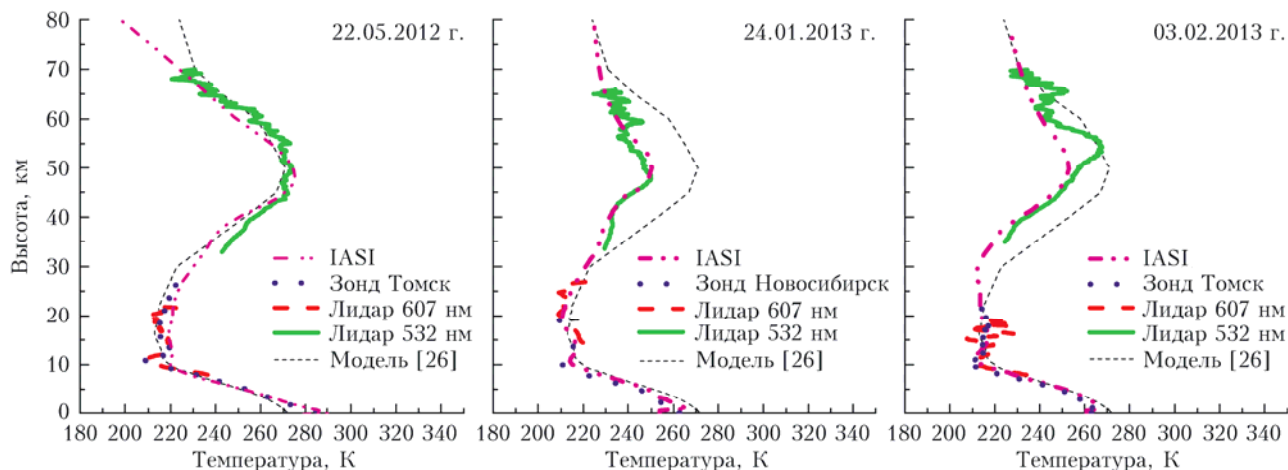


Рис. 5. Примеры одновременных лидарных, радиозондовых и спутниковых измерений температуры

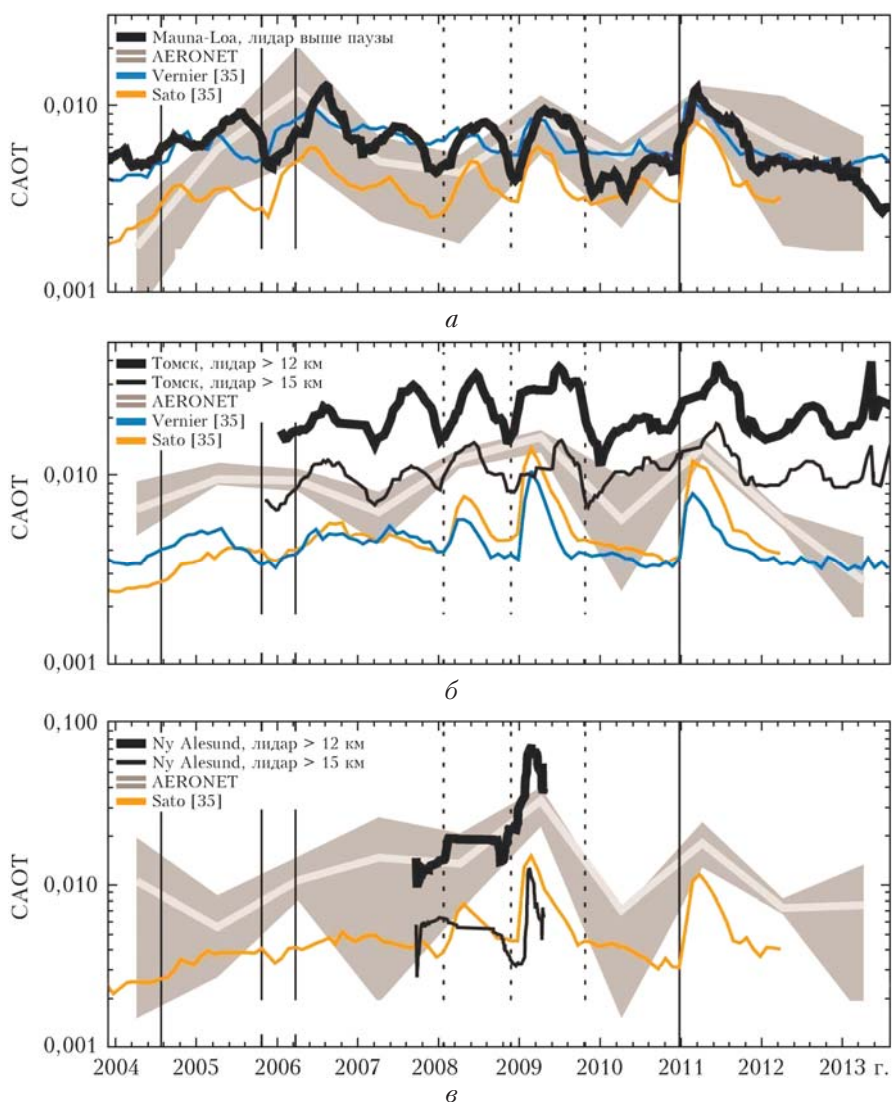


Рис. 6. Изменения САОТ за период 2004–2013 гг. между 30° ю.ш., 30° с.ш. (а), 45° с.ш., 60° с.ш. (б) и 60° с.ш., 90° с.ш. (в). Спутниковые данные Vernier et al. (голубые), Sato et al. (оранжевые) и AERONET (светло серые), а также 25–75%-я неопределенность (темно-серые кривые). Лидарные данные восстановлены от 15 км и выше (тонкие черные кривые) и от 10–12 км и выше (толстые черные кривые). В Мауна-Лоа тропопауза находится на высоте 15–16 км и показана только одной линией. Сплошные и пунктирные вертикальные линии показывают тропические и высокоширотные извержения соответственно