

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.338, 535.341, 551.508.953, 551.510.41

Измерения содержания водяного пара различными методами. Сравнения профилей водяного пара и аэрозоля

И.Э. Пеннер¹, Ю.С. Балин¹, М.В. Макарова², М.Ю. Аршинов¹,
Б.А. Воронин¹, Б.Д. Белан¹, С.С. Васильченко¹, В.И. Сердюков¹,
Л.Н. Сеница¹, Е.Р. Половцева¹, Д.М. Кабанов¹, Г.П. Коханенко^{1*}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет
198504, г. Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Ульяновская, 1

Поступила в редакцию 28.01.2014 г.

Представлены результаты измерения общего содержания водяного пара, полученные в Томске весной 2012 г. во время комплексного эксперимента, проведенного Институтом оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН) с использованием различных методов и средств. Сравниваются данные, полученные Фурье-спектрометром, солнечным фотометром, а также данные спутниковых, самолетных, лидарных и радиозондовых измерений.

Регистрация спектров поглощения солнечного излучения, прошедшего через всю толщу атмосферы Земли, проводилась на Фурье-спектрометре IFS-125M (Bruker) в диапазоне 400–1250 нм. Результаты, полученные в ходе измерений, обрабатывались программой SFIT v3.92, в которой использовались данные метеозондирования на станциях ВМО и радиозондовые ИОА СО РАН. В качестве априорных профилей концентраций газов в атмосфере были использованы профили, рассчитанные при помощи климатической модели WACCM. Измерения общего влагосодержания и аэрозольной оптической толщи атмосферы в ИОА СО РАН осуществляются с помощью автоматизированных солнечных фотометров серии SP.

Сравнение измерений солнечного фотометра с Фурье-измерениями показало, что разница между ними составляет ~0,8%. Содержание водяного пара в слое 0,4–7 км, полученное нами по результатам Фурье-спектрометрических измерений (1,30 г/см²), с точностью до 2% согласуется с результатами самолетных измерений для того же атмосферного слоя (1,32 г/см²).

Результаты ночных лидарных измерений аэрозольных слоев и водяного пара методом СКР позволяют судить о хорошем соответствии данным измерений радиозондов и о высокой степени корреляции содержания водяного пара и аэрозоля по слоям.

Ключевые слова: лидар, комплексный эксперимент, Фурье-спектрометр, профили водяного пара; lidar, complex experiment, Fourier spectrometer, vertical distribution of water vapor.

Введение

Водяной пар является важнейшим климатообразующим газом, участвующим в радиационных и энергетических процессах земной атмосферы. Непрерывные измерения содержания водяного пара – основ-

ного естественного парникового газа – необходимы для исследования изменений климата Земли [1]. Измерительными системами, обеспечивающими основной массив оперативных данных по содержанию и профилям водяного пара в тропосфере, являются аэрологическое зондирование и спутниковые измерения (например, IASI MetOP). При этом согласованность данных радиозондирования из-за использования различных типов датчиков остается до сих пор под вопросом [2]. С другой стороны, наземные спектральные измерения, проводимые на стандартной аппаратуре (например, сеть NDACC), позволяют с высокой точностью регистрировать спектры пропускания атмосферы и определять содержание различных газовых составляющих атмосферы, в том числе и водяного пара [3].

* Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru); Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Мария Владимировна Макарова; Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Александрович Воронин (bor@asd.iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Семен Сергеевич Васильченко (vss544@gmail.com); Виктор Иванович Сердюков (vis@asd.iao.ru); Леонид Никифорович Сеница (sln@asd.iao.ru); Елена Рудольфовна Половцева (elena@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru).

Основная задача настоящего исследования заключалась в одновременных наземных измерениях общего содержания водяного пара в атмосфере над г. Томском при помощи солнечного фотометра и Фурье-спектрометра, а также в анализе полученных данных с привлечением данных самолетного и спутникового зондирования. Эти измерения велись в рамках комплексного эксперимента с участием различных групп ИОА СО РАН. Весь эксперимент проходил с 17 по 23 мая 2012 г. в г. Томске (56,48° с.ш., 85,04° в.д., 160 м над у.м.) и его окрестностях. Самолетное зондирование проводилось над фоновым районом, расположенным западнее г. Томска 22 мая 2013 г. с использованием самолета-лаборатории Ту-134 [4]. В настоящей статье приводятся результаты этих экспериментов, а также данные лидарных измерений водяного пара и аэрозоля.

Аппаратура и методика измерений на Фурье-спектрометре

Регистрация спектров поглощения солнечного излучения, прошедшего через всю толщу атмосферы Земли, проводилась на Фурье-спектрометре Bruker IFS-125M. Параметры регистрации спектра следующие: спектральный диапазон 25000–8000 см^{-1} (400–1250 нм), разрешение 0,05 см^{-1} , частота работы сканера 20 кГц, диаметр апертуры 0,6 мм, время одного измерения 10 мин, число усредняемых сканов 36, фотоприемник – кремниевый фотодиод.

Спектрометр позволял проводить измерения при диаметре апертуры 0,85 мм (тогда отношение сигнал-шум увеличивалось в 2–3 раза), однако при этом наблюдалась конволюция (искажение) спектров в высокочастотной области 400–500 нм. В области 18000 см^{-1} отношение сигнал-шум составляло 100. Ввод излучения в спектрометр проводился оптоволоконным солнечным трекером, подробно описанным в [5].

Анализ регистрируемого спектра солнечного излучения выявил в спектре синусоидальные помехи с «периодами» 17–18 см^{-1} (амплитуда ~1% от max сигнала) и около 9 см^{-1} (амплитуда ~0,3% от max сигнала).

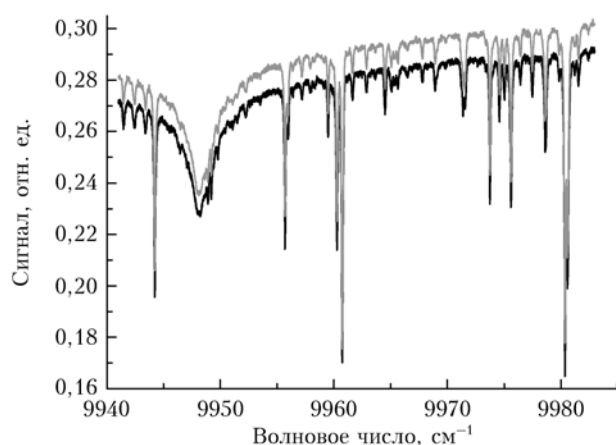


Рис. 1. Экспериментальный спектр поглощения солнечного излучения, зарегистрированный в атмосфере 22.05.2012 (время 8:48, 8:59 и 9:09) в диапазоне 9941–9982 см^{-1}

нала). Наличие таких помех связано, по-видимому, с использованием в солнечном трекере оптоволоконного кабеля для ввода излучения.

Наблюдения в указанный период проводились с 8:30 до 18:00 местного времени при наличии достаточных для проведения регистрации спектров разрывов в облачности. Типичные примеры регистрируемого спектра представлены на рис. 1.

Обработка Фурье-спектров

Специфика описываемых Фурье-спектрометрических измерений в атмосфере состоит в нестандартности спектрального диапазона измерений. В сетях NDACC [6] и TCCON [7] измеряемые участки спектра обычно расположены в более длинноволновом ИК-диапазоне (~700–5000 и ~4000–9000 см^{-1} соответственно), где имеют место полосы поглощения химически и климатически активных газов (например, CO_2 , CH_4 , N_2O , CO и т.д.). В нашем случае смещение интервала измерений в коротковолновую область сужает список определяемых газов, по сути, до водяного пара и молекулярного кислорода.

Процедуры определения содержания газов в атмосфере, разработанные и унифицированные специально для сетевых измерений NDACC и TCCON, предусматривают использование набора стандартных спектральных интервалов и единообразной входной информации [7, 8]. Это позволяет избежать систематических рассогласований в результатах измерений общего содержания газов для различных станций (которые, например, могут быть связаны с погрешностями спектроскопической информации) [8].

На сети TCCON для определения общего содержания водяного пара в атмосфере обычно используется 9 интервалов, содержащих линии H_2O в полосах поглощения 1,87 и 1,38 мкм [7]. В наших экспериментах все эти интервалы лежат вне диапазона измерений, поэтому был осуществлен выбор собственных спектральных интервалов с учетом того, что программа SFIT v3.92 [9, 10], с помощью которой проводилось определение общего содержания H_2O по измеренным спектрам, имеет ограничение по шкале волновых чисел 10000 см^{-1} .

Были рассмотрены 10 интервалов разной ширины (от 35 до 0,6 см^{-1}) в диапазоне 9900–9999 см^{-1} (например, 9930–9965, 9943,6–9944,7, 9973,5–9974,1 см^{-1} и т.д.), содержащих линии водяного пара. На основе численных экспериментов, а также обработанных измеренных спектров (для всех 10 спектральных интервалов) было получено, что интервалы 9979,4–9981,15 и 9941–9958 см^{-1} среди исследованных характеризуются наименьшими значениями случайных погрешностей определения общего содержания H_2O в атмосфере.

При обработке спектров 22 мая 2012 г. необходимая информация о профилях температуры $t(z)$ и давления $P(z)$ была взята из данных аэрологического зондирования (ст. Колпашево, ВМО № 29231; 58,31° с.ш., 82,95° в.д.; Новосибирск, ВМО № 29634; 54,96° с.ш., 82,95° в.д.) и спутниковых измерений IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer,

спутник MetOP) [11]. В качестве априорных профилей концентраций газов в атмосфере были использованы профили, рассчитанные при помощи климатической модели WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model) [12]. Источником информации о линиях молекулярного поглощения служила спектроскопическая база данных HITRAN [13].

Определение общего содержания водяного пара в столбе осуществлялось на основе одновременной обработки спектральных интервалов 9979,4–9981,15 и 9941–9958 см^{-1} , при этом учитывалась возможность наличия синусоидальных помех в спектре. Процедура обработки состояла из двух этапов – последовательных запусков программы SFIT. На первом этапе оценивалось реальное отношение сигнал-шум в спектральных интервалах 9979,4–9981,15 и 9941–9958 см^{-1} . При этом в программе SFIT в качестве первого приближения отношения сигнал-шум ис-

пользовалось значение, определявшееся по участкам спектра с полным поглощением. Окончательное решение обратной задачи по определению общего содержания H_2O уже с реальным значением сигналом осуществлялось на втором этапе.

Примеры измеренных и рассчитанных спектров, а также рассогласования между ними для интервалов 9979,4–9981,15 и 9941–9958 см^{-1} приведены на рис. 2 и 3. По осям ординат рис. 2 и 3 отложен сигнал, зарегистрированный Фурье-спектрометром и затем нормированный на свое максимальное значение в рассматриваемом спектральном интервале. Оценка случайной составляющей погрешности определения общего содержания H_2O по выбранным интервалам составляет $\sim 0,6\%$.

Фотометрические измерения

Измерения общего влагосодержания в столбе атмосферы выполняются в ИОА СО РАН в круглогодичном мониторинговом режиме с помощью автоматизированных солнечных фотометров серии SP [14, 15]. Регистрация проводится с интервалом в одну минуту в условиях, когда Солнце не перекрыто облаками.

Определение общего влагосодержания осуществляется по соотношению сигналов фотометра в двух спектральных каналах: в полосе поглощения водяного пара 0,94 $\mu\text{м}$ и вне полосы – 0,87 $\mu\text{м}$. Спектральная полуширина светофильтров составляет $\sim 0,01 \mu\text{м}$. Используемые при восстановлении общего влагосодержания зависимости отношений пропускания $T_{0,94}/T_{0,87}$ от поглощающей массы рассчитываются на основе базы данных HITRAN [13] с учетом аппаратных функций спектральных каналов [16]. Погрешность определения общего влагосодержания спектрофотометрами составляет 0,2–0,5%. Более подробно методика калибровки фотометра и восстановления аэрозольной оптической толщи (АОТ) и общего влагосодержания (ОВС) атмосферы описана в работах [17, 18].

Самолетные измерения

Для исследования вертикального распределения состава климатически значимых компонентов тропосферы использовался аналитический комплекс аппаратуры, установленный на борту самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» [4]. Полет выполнялся из аэропорта «Ельцовка» г. Новосибирска 22.05.2012 г. Сразу после взлета самолет начал набор высоты до 7000 м для перелета в район исследований (окрестности г. Томска). По достижении максимальной высоты над районом исследования самолет плавно снижался до высоты 500 м над уровнем поверхности земли, поэтапно выполняя режим горизонтального полета (в течение 6–7 мин) на восьми уровнях: 7000, 5500, 4000, 3000, 2000, 1500 и 500 м.

Погодные условия во время полета определялись малоградиентным полем повышенного давления. В районе проведения самолетного зондирования атмосферы наблюдались кучевые облака хорошей погоды (*Cu hum*, 4–6 баллов), система которых имела

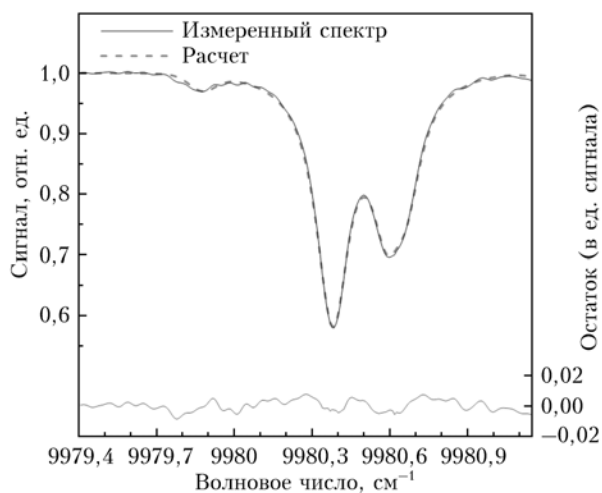


Рис. 2. Измеренный и рассчитанный спектры прямого солнечного излучения, а также разница между ними для интервала 9979,4–9981,15 см^{-1} (08:48, 22 мая 2012 г.)

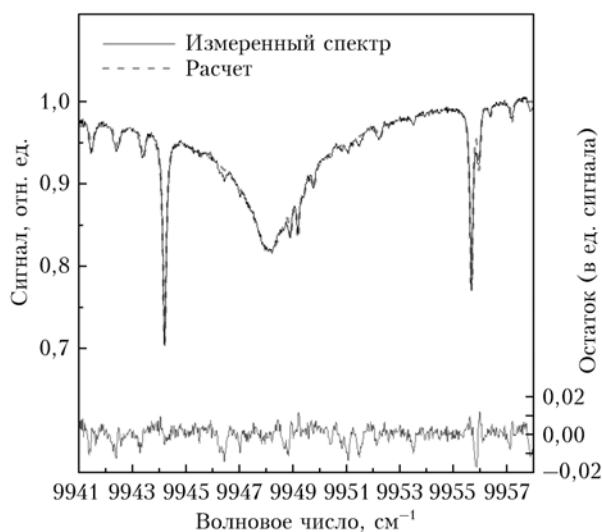


Рис. 3. Измеренный и рассчитанный спектры прямого солнечного излучения, а также разница между ними для интервала 9941–9958 см^{-1} (09:09, 22 мая 2012 г.)

шахматную структуру, что свидетельствовало о наличии конвективных ячеек в нижней тропосфере.

Для измерения концентрации основных парниковых газов применялся прецизионный газоанализатор Picarro G2301-m, специально разработанный для использования на борту самолетов и позволяющий одновременно измерять концентрацию углекислого газа, метана и водяного пара с частотой 1 Гц [19–21]. Принцип действия анализатора основан на методе спектроскопии внутрирезонаторного ослабления сигнала во времени (Cavity Ring-Down Spectroscopy – CRDS), позволяющем определять спектральные характеристики газовых молекул в оптическом резонаторе. В настоящее время этот прибор является самым лучшим в мире, так как точность измерений концентрации CO₂, CH₄ и H₂O составляет < 200 млрд⁻¹, < 1,5 млрд⁻¹ и < 150 млн⁻¹ соответственно.

Температурно-ветровое зондирование атмосферы

Температурно-ветровое зондирование осуществлялось с помощью Vaisala DigiCORA® MW31 [22, 23]. Тип использовавшегося радиозонда – Vaisala R92SGP, его характеристики приведены в табл. 1.

Комбинирование данного радиозонда и коррелятора GPS с системой DigiCORA® обеспечивает самый высокий в мире уровень измерений атмосферного давления P , температуры t и относительной влажности воздуха U , а также перманентное получение данных о ветре. Пример результатов температурно-ветрового радиозондирования приведен на рис. 4.

Запуск зонда был осуществлен 23.05.2012 в 01:00 по местному времени; измерялись параметры t , U , и скорости ветра V (см. рис. 4); максимальная высота 26 км.

Лидарные измерения

В мае–июне 2012 г. в рамках комплексного аэрозольного эксперимента проводилось зондирование аэрозольных полей вертикальной толщи тропосферы с помощью стационарного многочастотного лидара «ЛОЗА-С». Зондирование выполнялось на трех лазерных длинах волн 355, 532, 1064 нм с частотой следования импульсов 20 Гц и длительностью 10 нс. Кроме приема эхосигналов упругого обратного рассеяния на этих же длинах волн лидарная система регистрирует в ночное (темное) время суток сигналы комбинационного рассеяния на молекулярном азоте (387 и 607 нм) и водяном паре (407 нм). В дополнительном канале осуществлялась регистрация поляризационных компонент обратнорассеянного излучения на длине волны 532 нм. Многочастотный лидар обеспечивает восстановление качественной информации о вертикальном (от приземного слоя до нижних слоев стратосферы) распределении оптических (коэффициенты рассеяния и ослабления, оптическая толщина) и микрофизических (несферичность, фазовый состав, средний спектр размеров аэрозольных частиц в пределах идентифицированного слоя) свойств аэрозоля.

Более подробно описание лидара и методы восстановления оптических параметров изложены в [24].

На рис. 5 (цв. вклейка) показан пространственно-временной разрез аэрозольного поля тропосферы.

Таблица 1

Технические данные радиозонда Vaisala R92SGP

Датчик	Тип	Диапазон измерений	Разрешение	Точность	Время отклика
Температуры	Емкостный проволочный	–90...+60 °C	0,1 °C	0,5 °C*	< 0,4 с (1000 гПа)
				0,15 °C**	< 1 с (100 гПа)
				0,2; 0,3 и 0,5 °C***	< 2,5 с (10 гПа)
Влажности	Тонкопленочный конденсатор, подогреваемый двойной датчик	0...100%	1%	5%*	< 0,5 с при 6 м/с,
				2%**	1000 гПа и +20 °C
				2% U***	< 20 с при 6 м/с,
					1000 гПа и –40 °C
Давления	Силиконовый	3...1080 гПа	0,1 гПа	1 гПа (100...1080)*	–
				0,6 гПа (3...100)**	
	0,4 гПа (100...1080)**				
	0,3 гПа (3...100)**				
	0,5 гПа (100...1080)***				
	0,3 гПа (3...100)***				
Скорости и направления ветра	GPS-приемник с корреляцией кода	–	–	0,15 м/с 2°	–

Примечания: * Общая погрешность зондирования. ** Воспроизводимость калибровки. *** Воспроизводимость результатов зондирования.

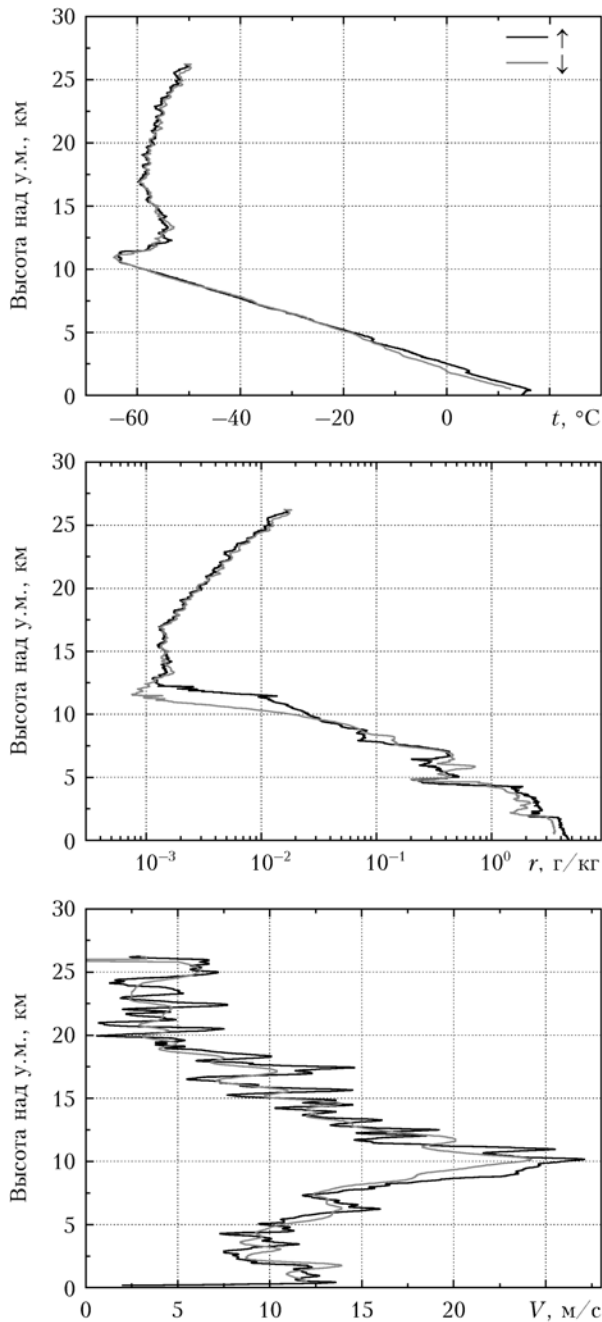


Рис. 4. Вертикальные профили температуры, отношения смеси и скорости ветра, полученные во время запуска радиозонда в 01:00 ч 23.05.2012

На рис. 6 (цв. вклейка) представлен фрагмент пространственно-временного разреза аэрозольного поля тропосферы в единицах отношения рассеяния (отношение суммы аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния к молекулярному) по данным зондирования за 23 мая 2012 г. с 00:00 до 04:00 местного времени. График эквивалентно-потенциальной температуры Θ по данным зонда (23.05.2012, 01:00). На нижней панели — отношение деполаризации обратнорассеянного излучения от аэрозольного поля того же фрагмента, но в пределах пограничного слоя.

Обсуждение результатов измерений

На рис. 7 приведены результаты Фурье-спектрометрических и фотометрических измерений общего содержания (ОС) водяного пара в атмосфере 22 мая 2012 г.

Кроме уже упомянутых измерений к анализу были привлечены:

- результаты радиозондирования для пяти ближайших аэрологических станций: Колпашево, Новосибирск, Емельяново, Барабинск (07:00 и 19:00) и Томск (данные для 01:00 23 мая 2012 г.);

- самолетные измерения концентрации водяного пара, осуществлявшиеся 22 мая в районе Томска (~ 11:40–13:00);

- спутниковые измерения IASI MetOP (11:14 и 12:53).

Все соответствующие значения общего содержания H_2O также приведены на рис. 7.

Территория, где осуществлялся комплексный эксперимент (есть данные наземных, самолетных и спутниковых измерений), а также указано расположение станций метеорологического зондирования, представлена на рис. 8.

В табл. 2 даны значения ОС H_2O , зарегистрированные Фурье-спектрометром и солнечным фотометром в совпадающие или пересекающиеся периоды времени, при этом учитывалась разная длительность измерений Фурье-спектрометром (~ 10 мин) и фотометром (обычно 1 мин).

Сравниваются средние значения ОС H_2O , полученные за относительно короткие промежутки времени (~ 10–20 мин) и за более длительные периоды (1–1,5 ч). Коэффициент корреляции для данных верхних 11 строк табл. 2 составил $r = 0,97$ (r статистически значим, $3\sigma = 0,6$). Относительная разность между двумя типами спектральных измерений (δ , %) принимает как положительные, так и отрицательные значения, не превышающие (по абсолютному значению) 2%. В среднем для 22 мая 2012 г. δ составляет ~ 0,5%: фотометрические измерения обычно дают более высокие значения ОС H_2O . Суммарная случайная погрешность обоих типов измерений составляет ~ 1,1%, что больше среднего значения δ (0,5%) за весь день, но меньше отдельных значений δ , которые до 1,5 раза превышают эту суммарную погрешность.

Отметим, что максимальные значения δ (1,2–1,7%) (см. табл. 2) имеют место при максимальной высоте Солнца (12:00–14:00). Например, для 12:14–12:34 и 12:56–13:06 δ составляло 1,2 и 1,5% соответственно. В то же время при осреднении всех данных за 40-минутный интервал (~ 12:20–13:00, включающий два уже упомянутых выше), значение δ меняет знак ($\delta = -0,5\%$). Это связано с тем, что в большую 40-минутную выборку дополнительно входят ОС H_2O , не в 10/20-минутных выборках. Таким образом, при определенных условиях (нестабильное состояние атмосферы, несовпадение периодов сравниваемых измерений) на значения разности между двумя типами измерений δ существенное влияние будет оказывать естественная

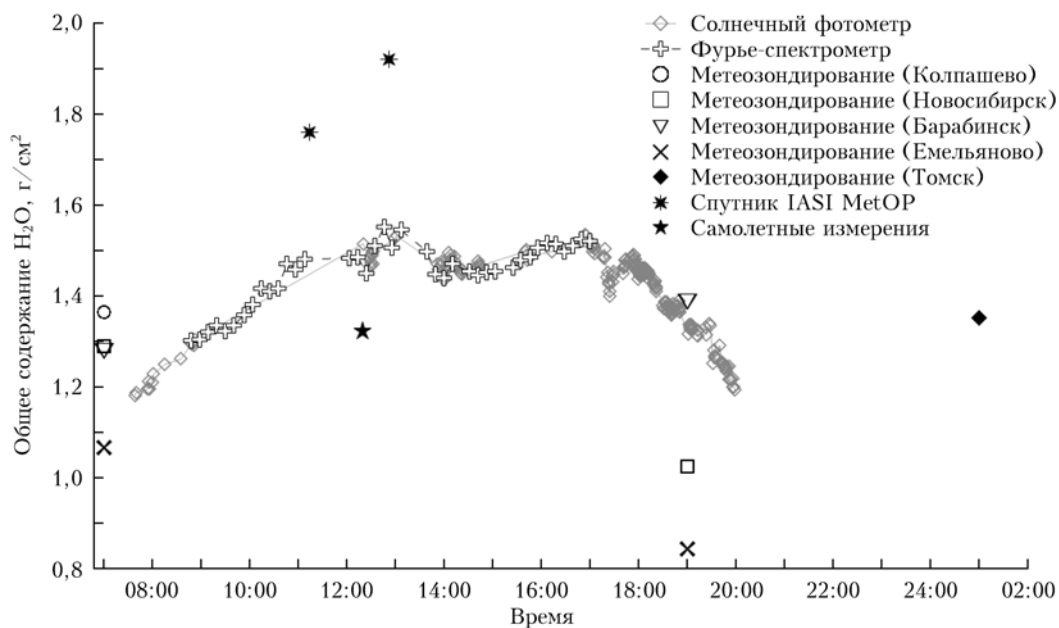


Рис. 7. Результаты измерений ОС H₂O.



Рис. 8. Территория комплексного эксперимента, расположение станций метеорологического зондирования

Таблица 2

Значения ОС H₂O, полученные по измерениям Фурье-спектрометра и солнечного фотометра, а также их относительная разность δ

Солнечный фотометр		Фурье-спектрометр		δ , %
Время (количество измерений)	ОС H ₂ O	Время (количество измерений)	ОС H ₂ O	
1	2	3	4	5
08:48–08:53 (4)	1,296 ± 0,006	08:48–08:59 (1)	1,303 ± 0,008	–0,5
12:20–12:33 (11)	1,49 ± 0,01	12:14–12:34 (2)	1,47 ± 0,03	1,2
12:59–13:01 (2)	1,529 ± 0,005	12:56–13:06 (1)	1,51 ± 0,01	1,5
13:51–13:59 (7)	1,47 ± 0,01	13:49–13:59 (1)	1,45 ± 0,01	1,2
14:00–14:08 (7)	1,46 ± 0,02	14:00–14:10 (1)	1,44 ± 0,01	1,7
14:12–14:21 (5)	1,47 ± 0,02	14:11–14:21 (1)	1,47 ± 0,01	–0,3
14:39–14:44 (6)	1,467 ± 0,007	14:32–14:52 (2)	1,450 ± 0,002	1,2
15:40–15:47 (5)	1,49 ± 0,01	15:35–15:46 (1)	1,48 ± 0,01	0,8
16:13 (1)	1,498 ± 0,007	16:07–16:17 (1)	1,52 ± 0,01	–1,3

1	2	3	4	5
16:54–16:55 (2)	1,534 ± 0,003	16:50–17:00 (1)	1,53 ± 0,01	0,6
17:02–17:05 (9)	1,506 ± 0,007	17:00–17:10 (1)	1,52 ± 0,01	–0,9
<i>Среднее δ, %</i>				0,5
12:20–13:01 (14)	1,49 ± 0,02	12:14–12:56 (5)	1,50 ± 0,04	–0,6
13:51–14:44 (27)	1,46 ± 0,02	13:49–14:42(5)	1,45 ± 0,01	0,9
15:40–17:06 (17)	1,50 ± 0,01	15:35–17:00 (9)	1,51 ± 0,02	–0,1

изменчивость водяного пара в атмосфере. Действительно, оценка величины естественной изменчивости ОС H_2O в период ~ 12:20–13:00 по данным фотометрических и Фурье-спектрометрических измерений составляет ~ 2–3% (СКО), что заметно выше суммарной погрешности этих наблюдений.

Отметим, что при обработке обоих типов наземных спектральных измерений была использована несогласованная по спектру входная информация, что может приводить к некоторому рассогласованию результатов. В процессе выбора спектральных интервалов, используемых для определения ОС H_2O по спектрам Фурье-спектрометра, мы оценили систематическую разницу значений ОС H_2O , получаемых при обработке с использованием различных спектральных интервалов: она может составлять до 2% от ОС H_2O .

Таким образом, для более детального изучения причин наблюдающихся рассогласований между результатами измерений Фурье-спектрометра и солнечного фотометра необходимо дополнительно провести ряд одновременных измерений и осуществить их обработку с использованием унифицированной априорной информации (для обоих типов наземных спектральных измерений), а в дальнейшем, возможно, скорректировать набор спектральных интервалов для Фурье-спектрометрических измерений.

Хорошо согласующиеся результаты наземных измерений, полученные двумя независимыми спектральными приборами, лежат в более широком коридоре значений ОС H_2O , полученных другими системами наблюдений (см. рис. 7). Аэрологические станции расположены на значительном удалении от Томска (см. рис. 8), что может объяснять наблюдаемые различия со спектральными измерениями. В то же время полеты самолета-лаборатории (измерявшего профиль концентрации H_2O для высот ~ 0,4–7 км) и спутниковые измерения IASI проводились вблизи места проведения наземных спектральных измерений.

Видно, что спутниковые значения ОС H_2O для 11:14 и 12:53 выше соответствующих по времени спектральных наземных измерений на 20 и 25%, а самолетные (11:44–12:55) – ниже на 11%. Относительно низкое значение ОС H_2O для самолетных измерений (см. рис. 7) объяснимо отсутствием данных для нижнего 400-метрового слоя. Оценки, проведенные нами, показывают, что на этот слой может приходиться в среднем 10–15% от ОС H_2O , при этом доля водяного пара, содержащаяся выше 7 км, обычно не превышает 0,5%. После исключения вклада нижнего 400-метрового слоя из общего содержания, по

данным Фурье-спектрометрических измерений (12%), получим значение ~ 1,30 г/см², что в пределах 2% совпадает с оценкой содержания в слое 0,4–7 км по самолетным измерениям 1,32 г/см². Такое совпадение результатов дистанционных измерений с данными прямых самолетных можно считать хорошим, поскольку уже оцененная выше естественная изменчивость ОС H_2O для ~ 12:20–13:00 составляет 2–3%.

Для наиболее близко расположенных в пространстве и времени измерений (наземные, спутниковые и самолетные; в 11:00–13:00 22 мая 2012 г.) на рис. 9 приведены профили отношения смеси H_2O . Самолетные измерения представлены как в виде исходных данных, сглаженных скользящим средним (1 мин), так и средних значений, рассчитанных для 500-метровых слоев. Видно, что если наземные Фурье-спектрометрические измерения имеют хорошее согласие с самолетными измерениями в слоях примерно до 3 км, то спутниковые измерения лучше воспроизводят профиль водяного пара в слоях выше 3–4 км (что, вероятно, связано с различной чувствительностью наземных и спутниковых измерений к изменениям содержания водяного пара в нижней и верхней тропосфере).

В силу специфики дистанционных измерений (наземных и спутниковых), обычно они не могут обеспечить высокого вертикального разрешения, которое можно получить, как мы видим, например, при прямых самолетных измерениях. В некоторых случаях спектральные измерения позволяют определять только общее содержание газа в атмосфере (один слой, пример – измерения солнечного фотометра), в других случаях возможно восстановление содержания газа в нескольких слоях атмосферы (двух–трех слоях для наших Фурье-спектрометрических наблюдений). Однако такие профили можно рассматривать только как сильно усредненные, сглаженные (см. рис. 9, профиль водяного пара по результатам Фурье-спектрометрических измерений). Отметим, что для более корректного сравнения профилей водяного пара по данным прямых (аэрологических и самолетных) и дистанционных (Фурье-спектрометрических) измерений в дальнейшем необходимо учесть усредняющие ядра обратной задачи по восстановлению профиля водяного пара по спектрам, зарегистрированным Фурье-спектрометром (на данном этапе нами такой задачи не ставилось) [18, 19].

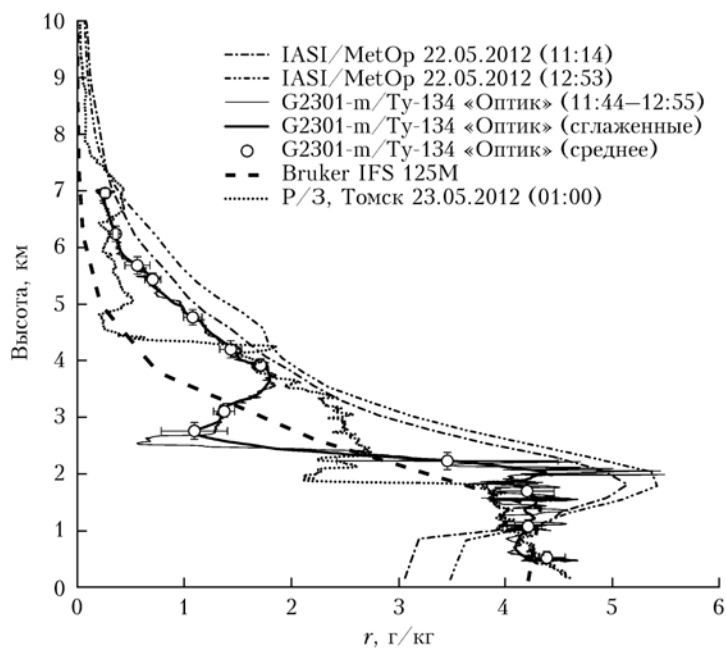


Рис. 9. Вертикальное распределение отношения смеси (r) в тропосфере по данным спутникового и самолетного зондирования и измерений, проводившихся Фурье-спектрометром

Несмотря на полученное удовлетворительное согласие данных по ОС H_2O , вертикальное распределение водяного пара может очень сильно отличаться в зависимости от географического положения и времени суток (рис. 10). Видно, что наилучшее подобие можно отметить между профилями, полученными с помощью самолета Ту-134 и радиозонда

Vaisala RS92-SGP (P/З Томск), выпущенного со станции высотного зондирования атмосферы (СВЗА ИОА СО РАН) на высотах до 2 км, в районе 4 км и выше 6. К недостаткам данных, взятых с сети аэрологических станций ВМО, можно также отнести невысокое разрешение по высоте. Радиозондирование на базе СВЗА ИОА СО РАН проводилось в исследовательском режиме (Research PTU and wind sounding), позволяющем получать намного более подробную информацию о стратификации атмосферы.

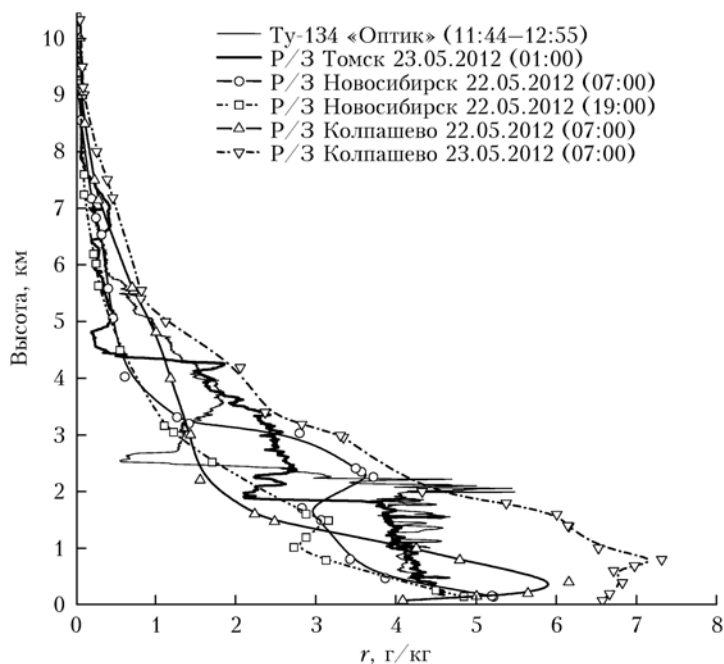


Рис. 10. Вертикальное распределение отношения смеси r в тропосфере по данным аэрологического и самолетного зондирования. P/З – радиозонд

Корреляция между аэрозолем и водяным паром

На рис. 11 (цв. вклейка) показан фрагмент пространственно-временного разреза аэрозольного поля тропосферы в единицах отношения рассеяния по данным лазерного зондирования за 23 мая 2012 г. с 01:05 до 03:40 местного времени. Данный временной интервал совпадает с запуском аэрологического зонда.

Общее время подъема и спуска зонда составило 2 ч 20 мин. По высоте фрагмент полностью охватывает планетарный пограничный слой до 2 км и часть свободной атмосферы до 5 км, так как в ней присутствовали устойчиво стратифицированные аэрозольные слои. Они контрастно выделяются по градиентам значений эквивалентно-потенциальной температуры по данным зонда за 23.05 01:00, графики которых показаны на рис. 6. На разрезе нанесены (см. рис. 11) усредненные (за первый час подъема зонда с 01:00 до 02:00 и за час опускания с 02:30 до 03:30) вертикальные профили коэффициентов обратного рассеяния лазерного излучения с длиной волны зондирования 532 нм – Bs01 и Bs03 (Backscatter – кривые зеленого цвета). Голубым цветом нанесен вертикальный профиль отношения смеси водяного пара в воздухе – MR (mixing ratio), восстановленный из данных лидарных измерений за весь временной интервал фрагмента. Оливковым цветом показаны профили отношения смеси водяного пара – MR, измеренные зондом соответственно при подъеме и спуске. Все профили привязаны к приблизительно соответствующим интервалам времени.

Видна значимая корреляция между профилями коэффициентов обратного рассеяния и отношения смеси водяного пара в воздухе, измеренного разными методами. Между профилем MR-лидара и средним (за подъем и спуск) профилем MR-зонда в пределах высот от 0,5 до 4,5 км коэффициент корреляции составляет 0,95, MR-зонда при подъеме и Bs01 – 0,86, MR-зонда при спуске и Bs03 – 0,87. Положительная корреляция между аэрозолем и водяным паром обусловлена тем, что аэрозоль преимущественно представлен в нижней тропосфере дисперсионной средой обводненного аэрозоля. Внутри аэрозольного поля происходят взаимосвязанные термодинамические процессы ассимиляции и диссимиляции влаги в поле переменной влажности воздуха. Положительная корреляция между аэрозолем и полем относительной влажности выявлялась и в ранее проведенных экспериментах как нефелометрическими [25], так и лидарными методами по изучению влияния влажности на локационное рассеяние в атмосфере [26]. Но оно проводилось по горизонтальным трассам и в пределах приземного слоя атмосферы.

Заключение

Анализ данных по общему содержанию водяного пара в атмосфере, полученных по результатам измерений различных систем наблюдений (назем-

ных, спутниковых, самолетных) для 22 мая 2012 г., показал следующее.

– Одновременные независимые наземные спектральные измерения ОС H_2O , осуществлявшиеся при помощи Фурье-спектрометра и солнечного фотометра, в среднем согласуются в пределах суммарной погрешности этих измерений ($\sim 1,1\%$) и имеют статистически значимый коэффициент корреляции $\sim 0,97$. Среднее значение относительной разности между данными типами спектральных измерений для 22 мая 2012 г. составляет $\sim 0,5\%$ (фотометрические измерения ОС H_2O выше).

– При нестабильном состоянии атмосферы и неточном совпадении периодов наблюдений на результаты сравнения ОС H_2O по данным различных измерительных систем существенное влияние могут оказать не только измерительные погрешности, но и естественная изменчивость водяного пара.

– Содержание водяного пара в слое 0,4–7 км, полученное нами по результатам Фурье-спектрометрических измерений ($1,30 \text{ г/см}^2$), с точностью до 2% согласуется с результатами самолетных измерений для того же атмосферного слоя ($1,32 \text{ г/см}^2$).

– Данные спутниковых измерений IASI MetOP для 11:00–13:00 22 мая 2012 г. выше наземных на 20–25%. Однако окончательные выводы о завышении спутником IASI значений ОС H_2O можно будет сделать только по результатам сравнений на большем массиве данных.

– Для того чтобы сделать более глубокий анализ данных, необходимо проведение одновременных исследований, точно совпадающих как по времени, так и по месту, что технологически очень сложно, так как, например, невозможно одновременно обеспечить пролет самолета и запуск радиозонда из-за соображений безопасности.

– Показано, что корреляция между профилями водяного пара и профилями аэрозоля может быть более 85% в пределах пограничного слоя атмосферы в диапазоне высот от 500 до 4500 м над землей.

Больше информации об измерениях, произведенных в ходе комплексного эксперимента, можно получить в работе [27]. Также необходимо отметить, что первое упоминание значительной корреляции между аэрозолем и водяным паром по данным вертикального зондирования атмосферы лидаром было в [28]. Представляет интерес в дальнейшем провести исследования корреляции аэрозольных полей и полей относительной влажности от поверхности, являющейся основным источником генерации аэрозоля и водяного пара, и распределения взаимосвязи этих полей до верхних слоев тропосферы.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории климатологии атмосферного состава – участникам летней экспедиции – за предоставление информации и С.А. Терпуговой за полезные обсуждения.

Работа выполнена при частичной поддержке программы РАН 3.9 и грантов РФФИ № 13-08-98013-а, 13-05-00096-а, 14-05-00526, 14-05-00590, 14-05-93108 и НИР СПбГУ 11.37.28.2011.

1. *Schneider M., Barthlott S., Hase F., González Y., Yoshimura K., Garcia O.E., Sep'ulveda E., Gomez-Pelaez A., Gisi M., Kohlhepp R., Dohe S., Blumenstock T., Strong K., Weaver D., Palm M., Deutscher N.M., Warneke T., Nottholt J., Lejeune B., Demoulin P., Jones N., Griffith D., W.T., Smale D., Robinson J.* Ground-based remote sensing of tropospheric water vapour isotopologues // *Atmos. Measur. Technol.* 2012. V. 5. P. 3007–3027. DOI: 10.5194/amt-5-3007-2012.
2. *Miloshevich L.M., Vomel H., Whiteman D.W., Leblanc T.* Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D11305. DOI: 10.1029/2008JD011565.
3. *Schneider M., Hase F.* Ground-based FTIR water vapour profile analyses // *Atmos. Measur. Technol.* 2009. V. 2. P. 609–619. DOI: 10.5194/amt-2-609-2009.
4. *Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аришинов М.Ю., Барсук В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Симицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филипов Д.В., Фофанов А.В., Чернов Д.Г., Шмаргунов В.С., Шмаргунов В.П.* Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
5. *Васильченко С.С., Сердюков В.И., Симица Л.Н.* Спектральная система измерений газовых атмосферных компонентов с оптоволоконной следящей системой и некоторые результаты анализа атмосферных спектров // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 10. С. 920–925.
6. URL: <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>
7. URL: <http://www.tccon.caltech.edu/>
8. *Sussmann R., Forster F., Rettinger M., Jones N.* Strategy for high-accuracy-and-precision retrieval of atmospheric methane from the mid-infrared FTIR network // *Atmos. Measur. Technol.* 2011. V. 4. P. 1943–1964.
9. *Rinsland C.P., Jones N.B., Connor B.J., Logan J.A., Pougatchev N.S., Goldman A., Murcray F.J., Stephen Th.M., Pine A.S., Zander R., Mahieu E., Demoulin P.* Northern and southern hemisphere ground-based infrared spectroscopic measurements of tropospheric carbon monoxide and ethane // *J. Geophys. Res.* D. 1998. V. 103, N 21. P. 28197–28218. DOI: 10.1029/98JD02515.
10. *Hase F., Hannigan J.W., Coffey M.T., Goldman A., Hopfner M., Jones N.B., Rinsland C.P., Wood S.W.* Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution groundbased FTIR measurements // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2004. V. 87. P. 25–52.
11. URL: <http://smsc.cnes.fr/IASI/index.htm>
12. *Garcia R.R., Marsh D.R., Kinnison D.E., Boville B.A., Sassi F.* Simulation of secular trends in the middle atmosphere, 1950–2003 // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D09301. DOI: 10.1029/2006JD007485.
13. *Rothman L.S., Barbe A., Benner D.C., Brown L.R., Camy-Peyret C., Carleer M.R., Chance K., Clerbaux C., Dana V., Devi V.M., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Jucks K.W., Laferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Nemtchinov V., Newnham D.A., Perrin A., Rinsland C.P., Schroeder J., Smith K.M., Smith M.A.H., Tang K., Toth R.A., Auwera J.V., Varanasi P., Yoshino K.* The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001 // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2003. V. 82, N 1. P. 5–44.
14. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С.* Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры // *Оптика атмосфер. и океана.* 2004. Т. 17, № 4. С. 354–360.
15. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В.* Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117.
16. *Чеснокова Т.Ю., Фирсов К.М., Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* Спектроскопическое обеспечение для функционирования солнечного фотометра SP-6 // *Оптика атмосфер. и океана.* 2004. Т. 17, № 11. С. 912–915.
17. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра // *Оптика атмосфер. и океана.* 1997. Т. 10, № 8. С. 866–874.
18. *Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С.* Информационная система для сетевых солнечных фотометров // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 1. С. 61–67.
19. *Rodgers C.* Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. World Scientific, 2000.
20. URL: http://www.picarro.com/gas_analyzers/flight_co2_ch4_h2o
21. *Rodgers C., Connor B.J.* Intercomparison of remote sounding instruments // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. DOI: 10.1029/2002JD002299.
22. URL: http://www.vaisala.ru/ru/products/sounding_systemsandradiosondes/soundingsystems/Pages/DigiCORA-MW31.aspx
23. URL: <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/Ozone%20Sounding%20with%20RS92-SGP%20Radiosonde%20Datasheet%20in%20English.pdf>
24. *Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Самойлова С.В.* Исследование вертикального распределения тропосферных аэрозольных слоев по данным многочастотного лазерного зондирования. Часть 1. Методы восстановления оптических параметров // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 4. С. 344–357.
25. *Панченко М.В., Терпугова С.А., Докукина Т.А., Польшкин В.В., Яушева Е.П.* Многолетняя изменчивость конденсационной активности аэрозоля в г. Томске // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 4. С. 314–318.
26. *Балин Ю.С., Креков Г.М., Самохвалов И.В., Рахимов Р.Ф.* Влияние влажности на локационное рассеяние в атмосфере // *Метеорол. и гидрол.* 1978. № 8. С. 114–119.
27. *Матвеев Г.Г., Белан Б.Д., Панченко М.В., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Ерёмин Т.А., Козлов В.С., Терпугова С.А., Польшкин В.В., Яушева Е.П., Чернов Д.Г., Одинцов С.Л., Бурлаков Б.Д., Симица Л.Н., Аришинов М.Ю., Ивлев Г.А., Савкин Д.Е., Фофанов А.В., Гладких В.А., Камардин А.П., Белан Д.Б., Гришаев М.В., Белов В.В., Афонин С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Антохин П.Н., Аришинова В.Г., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачёв Г.Н., Белан С.Б., Шмаргунов В.П., Воронин Б.А., Сердюков В.И., Половцева Е.Р., Васильченко С.С., Смирнов С.В., Макарова М.В., Сафатов А.С., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Максимова Т.А.* Комплексный эксперимент по измерению параметров атмосферы 22 мая 2012 г. в г. Томске // Десятое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Материалы докладов / Под ред. М.В. Кабанова. Томск, 2013. С. 156–171.
28. *Антонович В.В., Антохин П.Н., Аришинов М.Ю., Балин Ю.С., Ивлев Г.А., Кабанов Д.М., Козлов А.В., Козлов В.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Польшкин В.В., Пхалагов Ю.А., Рассказчикова Т.М., Самойлова С.В.,*

Тумаков А.Г., Ужегов В.Н., Фофанов А.В., Шмаргунов В.П., Яушева Е.П. Комплексный аэрозольный эксперимент на измерительном сайте ИОА СО РАН (Академгородок, г. Томск) в весенне-летний период 2011 г. // XVIII Междунар. симпози. «Оптика атмосферы и

океана. Физика атмосферы». 2–6 июля 2012 г. Иркутск (электронный сборник). Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. С. 1–5. URL: http://symp.iao.ru/ru/popup/blob/?table=report&fld=abstr_ru&pk=rep_id%3D%273940%27

I.E. Penner, Yu.S. Balin, M.V. Makarova, M.Yu. Arshinov, B.A. Voronin, B.D. Belan, S.S. Vasil'chenko, L.N. Sinitsa, V.I. Serdyukov, E.R. Polovtseva, D.M. Kabanov, G.P. Kokhanenko. **Investigations of total water vapor content using various techniques. Comparison of water vapor and aerosol profiles.**

The paper presents results of the water vapor total column measurements in the frame of combined experiment on May 22–23 at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics (IAO SB RAS). The comparison is carried out for H₂O total columns derived from simultaneously performed ground-based Fourier-spectrometer (FTIR) and sun photometer measurements, satellite and aircraft measurements, and also lidar and radiosondes measurements. Lidar and radiosondes experiments were carried out at night and the others in the afternoon.

FTIR measurements of the highly-resolved solar absorption spectra were made by the Fourier spectrometer IFS-125M (Bruker) in the range 400–1250 nm. The SFIT2 v3.92 software is used to retrieve water vapor total column from the fit to experimental spectra. Vertical profiles of atmospheric pressure and temperature required for retrieval of H₂O total columns were taken from the site of upper air soundings Kolpashevo (WMO N 29231) and Tomsk. Apriory gas profiles were created using WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model).

The measurements of the water vapor total column and the aerosol optical thickness in the atmosphere were carried out at IAO SB RAS by automated sun photometers (SP series). A comparison with the experimental results reveals that the difference between FTIR and sun photometer H₂O total column measurements is about 0.8%. The water vapor total column in a layer of 0.4–7 km, obtained by ground based FTIR technique (1.30 g/cm²) up to 2% is consistent with results of aircraft measurements (1.32 g/cm²) for the same atmospheric layer. A good agreement was found between the lidar and radiosondes measurements and a correlation between the mixing ratio of water vapor and aerosol over layers are revealed.

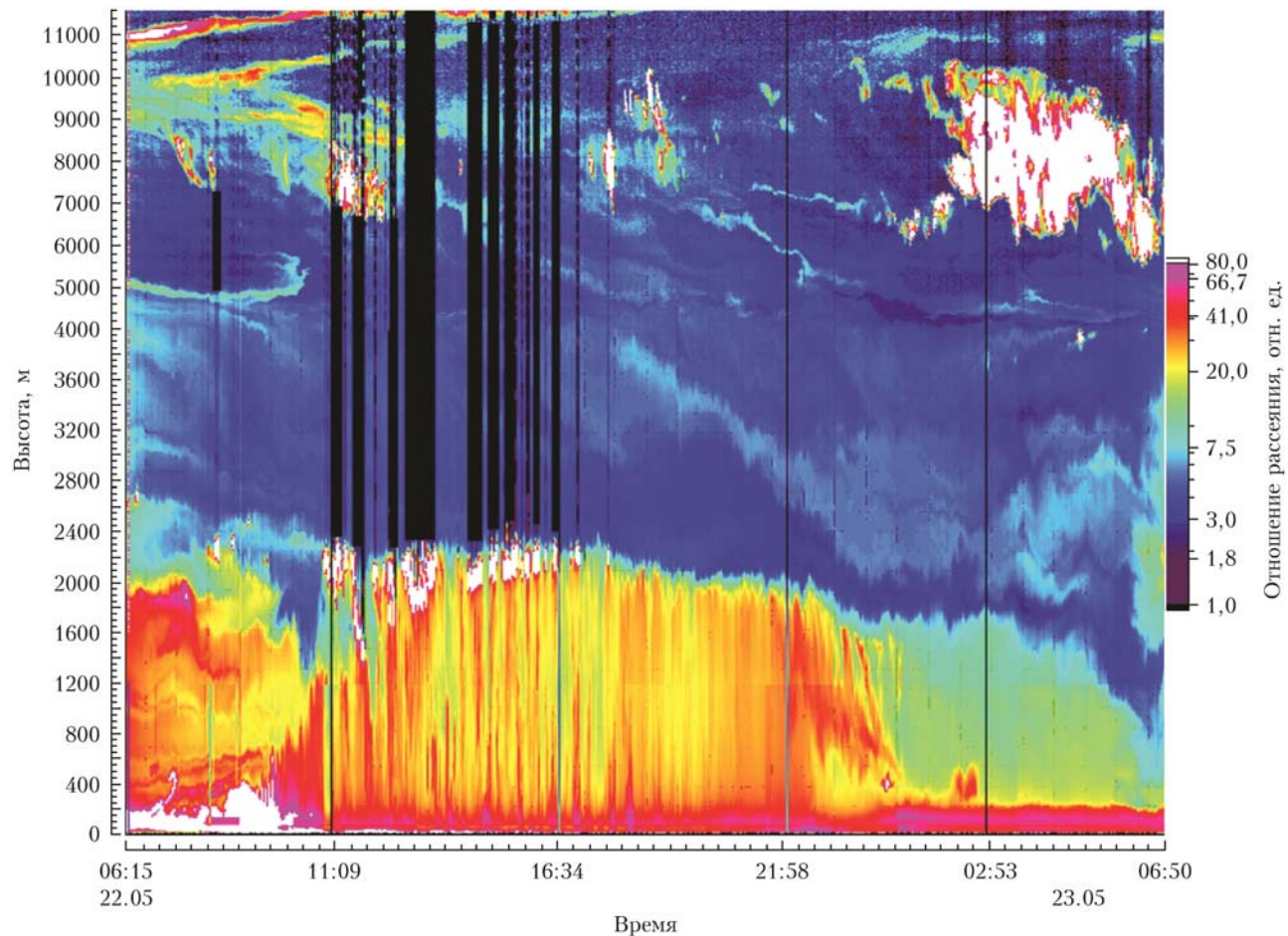


Рис. 5. Пространственно-временной разрез аэрозольного поля тропосферы в единицах отношения рассеяния по данным зондирования на длине волны 1064 нм лидаром «ЛОЗА-С» с 06:15 22.05.2012 г. до 06:50 местного времени 23.05.2012 г.

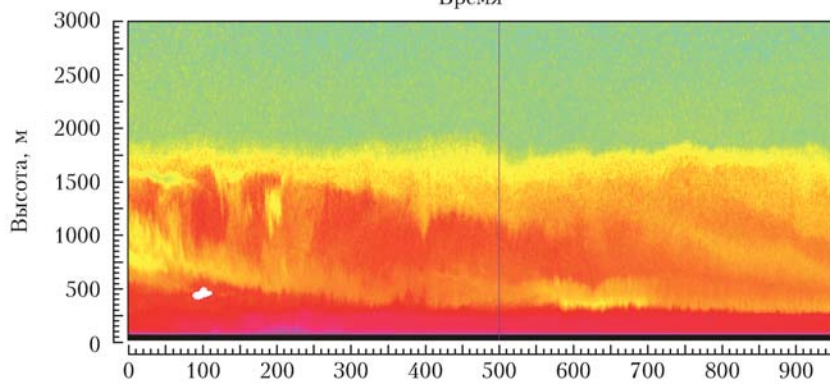
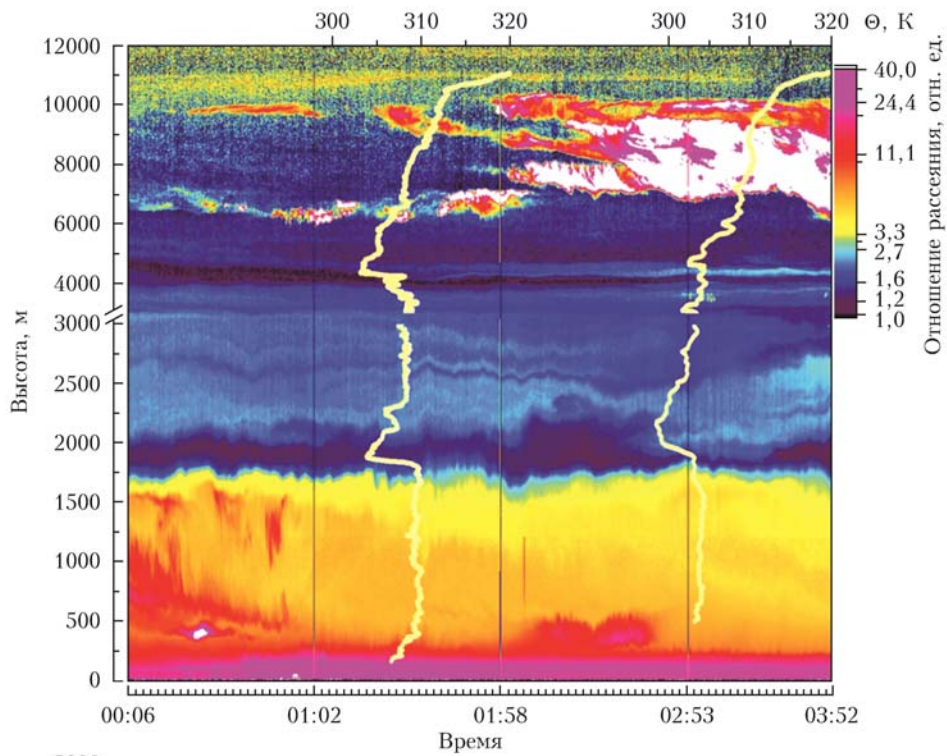


Рис. 6. Фрагмент пространственно-временного разреза аэрозольного поля тропосферы

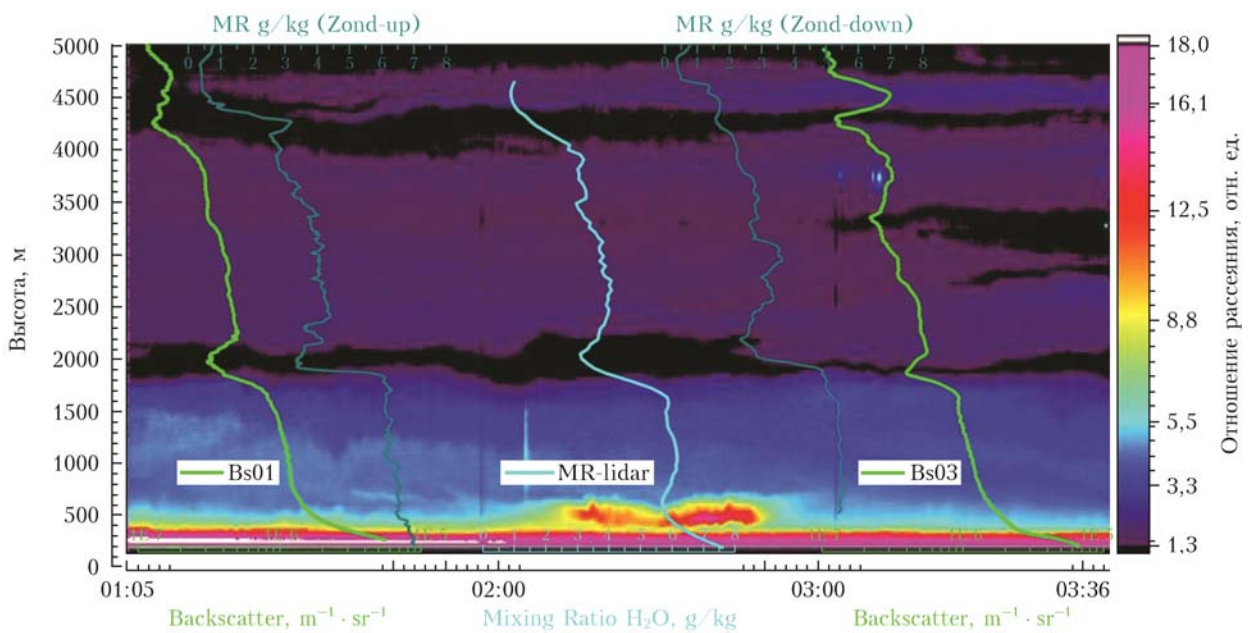


Рис. 11. Фрагмент пространственно-временного разреза аэрозольного поля тропосферы