

Измерения полностью разрешенного контура линии поглощения углекислого газа в полосе на $\lambda = 1.605$ мкм в столбе атмосферы методом гетеродинной спектрорадиометрии высокого разрешения

С.Г.Зеневич, А.Ю.Климчук, В.М.Семенов, М.В.Спиридонов, А.В.Родин

Рассмотрено применение метода гетеродинной регистрации сигнала для измерения спектра пропускания атмосферы в ближнем ИК диапазоне, позволившее впервые измерить контур отдельной линии колебательно-вращательной полосы CO_2 на трассе наблюдений Солнца с высоким для подобных измерений спектральным разрешением $\lambda/\delta\lambda = 10^8$. В совокупности с другими характеристиками прибора это дало возможность с высокой точностью измерить содержание двуокиси углерода в столбе атмосферы. Описаны экспериментальная установка и методика измерений. Проведен сравнительный анализ существующих комплексов для измерения содержания парниковых газов в атмосфере, демонстрирующий возможность применения метода гетеродинной спектрорадиометрии ближнего ИК диапазона для создания полезного и конкурентоспособного инструмента, который можно будет использовать при проектировании новых сетей наземных станций мониторинга парниковых газов.

Ключевые слова: лазерная спектроскопия, гетеродинная спектроскопия, инфракрасный диапазон, дистанционное зондирование, парниковые газы.

1. Введение

Развитие климатических моделей и основанные на них практические методики оценки естественного и антропогенного воздействия на климатическую систему требуют применения все более точных инструментов для определения химического состава атмосферы. В частности, для оценки интенсивности эмиссии парниковых газов (ПГ), таких как CO_2 , CH_4 , N_2O , NO , требуется измерение их содержания в атмосфере с субпроцентной точностью. В силу значительных вариаций содержания ПГ в приземном слое измерения проводят, как правило, средствами дистанционного зондирования либо с орбиты искусственного спутника Земли, либо с помощью наземных станций. Как правило, из-за относительно высокой концентрации углекислого газа в атмосфере (около 400 ppm) измерения проводятся на слабых, ненасыщенных в толще атмосферы линиях обертонов колебательно-вращательных полос в ближнем ИК диапазоне (с $\lambda = 1.58, 1.9$ и 2.02 мкм).

Одной из наиболее известных систем наземного мониторинга содержания ПГ в атмосфере Земли является международная сеть The Total Carbon Column Observing Network (TCCON) [1], созданная в начале XXI века для

дополнения и валидации данных спутниковых миссий SCIAMACHY, GOSAT, OCO/OCO-2. Это организация, в распоряжении которой находятся 30 измерительных станций, расположенных по всему миру. Основой измерительной станции TCCON является фурье-спектрометр 125HR (Bruker Optics GmbH). С его помощью проводятся измерения в широком спектральном диапазоне ($3900\text{--}15500\text{ см}^{-1}$), а ход его подвижного плеча, достигающий 0.45 м, обеспечивает спектральное разрешение до $\sim 0.02\text{ см}^{-1}$. Несмотря на стабильность режима измерений и высокую точность восстановления интегральной концентрации ПГ в атмосфере, достигающей $\sim 0.25\%$ для двуокиси углерода, измерительные станции, основанные на этом спектрометре, имеют ряд недостатков. Это высокая стоимость, большие размеры и масса прибора, а также необходимость наличия инфраструктуры и квалифицированного персонала. Все это накладывает значительные ограничения на мобильность станций TCCON и плотность покрытия измерениями земного шара. В то же время расширение сети наземных измерений необходимо, особенно в тех местах, где особенности орбит не позволяют проводить наблюдения со спутников.

Перечисленные недостатки сфокусировали внимание заинтересованных научных групп на разработке более компактных систем, которые могут служить альтернативой действующим станциям TCCON. Так, в технологическом институте Карлеруэ (Германия) был разработан компактный прибор на основе коммерческого фурье-спектрометра EM27 (Bruker Optics GmbH) [2]. Прибор с габаритами $35 \times 40 \times 27$ см, весом 25 кг и спектральным разрешением 0.5 см^{-1} способен восстанавливать интегральное значение концентрации CO_2 с точностью 0.08% . Низкие энергетические потребности и сопряженная с прибором компактная система наведения на Солнце [3] обеспечивают его высокую мобильность, а также возможность измерений на подвижных платформах. Разработчики прибора создали проект под названием Collaborative Carbon

С.Г.Зеневич, А.Ю.Климчук, В.М.Семенов. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: zenevich09@mail.ru

М.В.Спиридонов. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

А.В.Родин. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; Институт космических исследований РАН, Россия, 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

Поступила в редакцию 15 октября 2018 г., после доработки – 25 ноября 2018 г.

Column Observing Network (COCCON) и сообщили об успешных испытаниях спектрометров EM27 в кооперации с TCCON, которые длились 3.5 года [4].

Группа авторов из Японии предложила компактное устройство для дистанционного зондирования атмосферы на основе двух приборов [5]: дифракционного спектрометра, работающего в спектральных диапазонах 1565–1585 нм и 1674–1682 нм, и оптоволоконного интерферометра Фабри–Перо высокого разрешения, с помощью которого проводились измерения в спектральном интервале 1570–1575 нм. Измерения интегрального содержания ПГ в столбе атмосферы при помощи этого комплекса осуществлялись совместно с одной из станций сети TCCON. Авторы [5] сообщают, что статистическая ошибка восстановления интегрального содержания двуокиси углерода и метана не превышает 0.2%.

Методом, обеспечивающим наиболее высокое из возможных спектральное разрешение, является гетеродинамная спектроскопия. Несмотря на то что этот принцип спектрального анализа не получил пока широкого распространения в промышленных приборах, существует значительное количество работ по развитию методов гетеродинамной спектроскопии в среднем ИК диапазоне с использованием квантово-каскадных лазеров [6, 7]. В нашей работе рассматривается применение метода оптического гетеродинамирования для измерения спектров пропускания атмосферы в ближнем ИК диапазоне с целью прецизионного определения содержания ПГ.

Так, в 2014 г. группами авторов из лаборатории лазерного дистанционного зондирования Центра космического полета НАСА им. Годдарда была опубликована и запатентована концепция компактного гетеродинамного спектрометра mini-LHR [8, 9] на основе перестраиваемого диодного лазера, излучающего на длине волны 1573.6 нм и использующего систему оптических волоконных разветвителей для совмещения волновых фронтов. Были представлены первые результаты измерений спектров пропускания атмосферы с полностью разрешенным контуром отдельной линии колебательно-вращательной полосы CO₂ в выбранном спектральном диапазоне. Измерения проводились с использованием солнечного фотометра сети AERONET, который, в частности, служил входным каскадом системы ввода солнечного излучения в спектрометр [10]. Восстановление содержания двуокиси углерода обеспечивало ожидаемую статистическую погрешность ~ 8 ppm, что существенно хуже современных требований к наземным измерениям ПГ. Впоследствии были оптимизированы шумовые характеристики прибора и погрешностей измерений, а также измерено содержание метана с ожидаемой погрешностью 10 ppm [11, 12]. В этих работах упоминается о возможности как восстановления вертикального профиля концентрации ПГ, так и создания глобальной сети мониторинга ПГ с использованием гетеродинамных спектрометров на основе хорошо развитой сети AERONET (около 500 станций по всему миру). В 2017 г. был предложен прототип гетеродинамного спектрометра ближнего ИК диапазона для установки на микроспутник класса CubeSat 4U и заявлено о возможности измерений содержания не только углекислого газа и метана, но и паров воды, а также восстановления вертикальных профилей их концентраций [13]. Во всех приведенных выше примерах спектральное разрешение приборов не превышало 10⁶, что в основном связано с отсутствием отдельного канала стабилизации гетеродина, в качестве которо-

го выступает перестраиваемый диодный лазер с распределенной обратной связью.

Работы в области гетеродинамной спектрометрики в ближнем ИК диапазоне, которые ведутся в Московском физико-техническом институте с 2011 г., основаны на принципе стабилизации гетеродина по реперной линии поглощения. В работе [14] подробно описана и доказана возможность реализации методики гетеродинамного приема излучения в ближнем ИК диапазоне. В качестве опорного сигнала использовалось излучение перестраиваемого диодного лазера, в качестве широкополосного сигнала – излучение такого же лазера, работающего при токах инжекции ниже порогового значения. Для совмещения волновых фронтов исследуемого некогерентного излучения и излучения гетеродина служили одномодовые волоконные разветвители. В работе [15] подробно описан прототип гетеродинамного спектрометра для измерения содержания ПГ по прямому излучению Солнца, а также приведены результаты измерения спектров пропускания атмосферы и вертикальных профилей концентрации метана с ожидаемой погрешностью не более 1%. Однако разработанный прототип прибора обладал рядом недостатков, которые в значительной степени усложняли работу с получаемыми данными. В первую очередь это относится к нелинейным искажениям сигнала промежуточной частоты (ПЧ), привносимым аналоговым квадратичным детектором.

В настоящей работе представлен усовершенствованный прототип гетеродинамного спектрометра с высоким спектральным разрешением ($\lambda/\delta\lambda = \nu/\delta\nu = 10^7 - 10^8$, где $\nu = 1.8692 \times 10^{14}$ Гц – частота генерации лазера, а $\delta\nu = 10$ МГц – ширина аппаратной функция прибора) для полевых измерений и методика измерения содержания CO₂ в атмосфере, точность которой сопоставима с точностью, демонстрируемой существующими станциями мониторинга ПГ на основе дифракционных спектрометров и фурье-спектрометров высокого разрешения.

2. Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис.1,а. Использовался диодный лазер (ДЛ) с распределенной обратной связью фирмы NTT EL (Япония), смонтированный в 14-контактном корпусе типа butterfly со встроенными термоэлектрическим элементом Пельтье и терморезистором. Ширина линии генерации ДЛ составляет 2 МГц. Лазер имеет одномодовый волоконный выход с разъемом типа FC/APC, торцы которого скошены для предотвращения паразитного отражения сигнала в оптическом тракте. Длина волны генерации составляет 1.605 мкм (6230 см⁻¹) при максимальной выходной мощности около 14 мВт. ДЛ работает в квазипрерывном режиме при установленной температуре термоэлемента 321.6 К и накачивается трапецевидными импульсами тока длительностью 39.4 мс с частотой следования 20 Гц. Температура ДЛ стабилизирована на уровне ~10⁻⁴ К при помощи канала обратной связи, а плавная перестройка частоты генерации осуществляется за счет изменения тока накачки. Изменение амплитуды тока накачки в пределах 70–95 мА обеспечивает перестройку частоты излучения ДЛ в диапазоне 6229.75–6230.55 см⁻¹.

Прибор имеет два оптических канала: атмосферный, или гетеродинамный канал с фотоприемником ФП1 и ре-

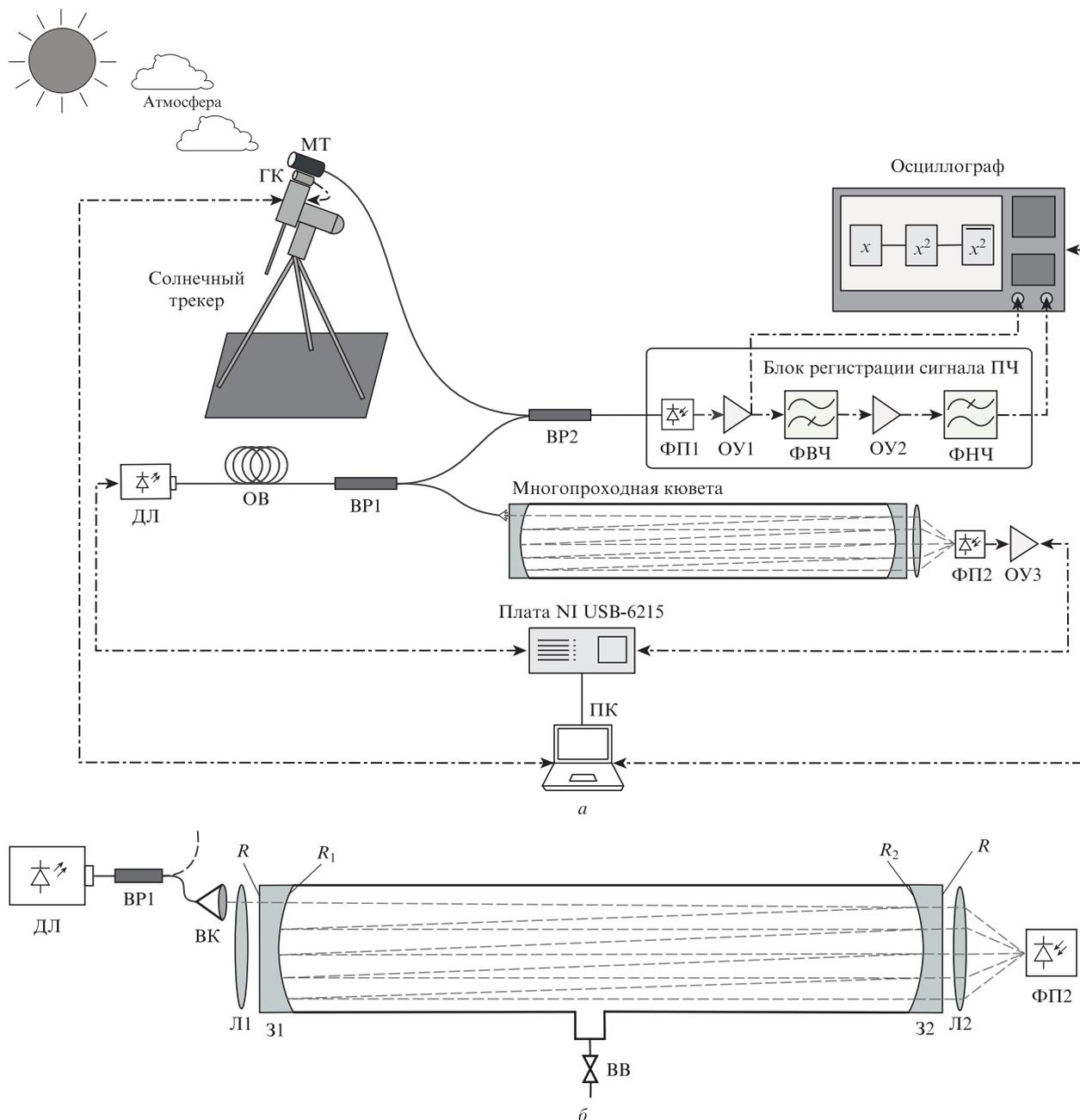


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки (а): ДЛ – диодный лазер; ОВ – оптическое волокно; ВР – волоконные разветвители; ФП – фотоприемники; ОУ – операционные усилители; ФВЧ – фильтр высоких частот; ФНЧ – фильтр низких частот; МТ – микротелескоп; ГК – гид-камера; ПК – персональный компьютер. Схема многопроходной кюветы (б): R – коэффициенты отражения поверхности оптического элемента; З и Л – зеркала и линзы; ВК – входной коллиматор; ВВ – впускной/выпускной вентиль.

перный канал с приемником ФП2 (рис. 1,а). Для регистрации оптических сигналов использовались широкополосные InGaAs-детекторы ФП1–G9801-22 и ФП2–G8370-82 (Hamamatsu). Лазерное излучение поступает в оптические каналы по оптико-волоконной системе на основе одномодового кварцевого оптического волокна (ОВ) с коннекторами типа FC/APC и одномодовыми волоконными разветвителями (ВР). ВР служат как для деления, так и для совмещения оптических сигналов, в частности ВР1 делит лазерное излучение на два канала в соотношении 10/90, так что 90% лазерного излучения отводится в реперную многопроходную кювету, а ВР2 совмещает сигнал гетеродина и солнечное излучение в процентном соотношении 5/95, так чтобы 95% приходилось на солнечное излучение, прошедшее через атмосферу. В одномодовом

вом ВР автоматически выполняется условие совмещения волновых фронтов оптических сигналов, а дифракционная расходимость на торце ОВ удовлетворяет условию антенной теоремы [16], что позволяет использовать ОВ для гетеродинного приема без каких-либо потерь полезного сигнала.

Основой реперного канала, предназначенного для стабилизации частоты излучения ДЛ, является многопроходная кювета системы ICOS [17], реализующая регистрацию интегрального выходного излучения из внеосевого высокодобротного резонатора. Принципиальная схема кюветы, разработанной авторами настоящей работы, представлена на рис. 1,б. Она содержит следующие основные элементы: два плосковогнутых зеркала З1 и З2, входной коллиматор ВК с оптоволоконным разъемом FC/APC,

входную плосковыпуклую линзу Л1 с фильтром диаметром 30 мм ($\Delta\lambda = 1600 - 1650$ нм), интегрирующую плосковыпуклую линзу Л2 (диаметр 25.4 мм, $f = 20$ мм) и фотоприемник ФП2. Подложки зеркал изготовлены из кварцевого стекла и имеют диаметр 35 мм, толщину по краям 6.35 мм, радиус кривизны 500 мм. На плоскую сторону каждого зеркала нанесено просветляющее покрытие с коэффициентом отражения $R \sim 0.2\%$. Вогнутая сторона зеркала 31 имеет «ионное напыление» с коэффициентом отражения $R_1 \sim 99.98\%$, а вогнутая сторона зеркала 32 – «электронное напыление» с коэффициентом отражения $R_2 \sim 98\%$. Зеркала смонтированы в герметичном корпусе из алюминиевого сплава так, что расстояние между их отражающими поверхностями равно 30 см. Общий объем кюветы составляет 212 см³. Благодаря высокоотражающим зеркалам кювета выполняет функцию резонатора, в котором после многократных отражений малоинтенсивное излучение, прошедшее через зеркало, фокусируется интегрирующей линзой Л2 на фотоприемник ФП2. Эффективная длина оптического пути кюветы составляет ~ 30 м. На боковой поверхности корпуса кюветы находится впускной/выпускной вентиль ВВ для подключения кюветы к вакуумной системе. Кювета наполнялась чистым газом СО₂ при давлении 150 мбар и использовалась, как было упомянуто выше, для стабилизации температуры ДЛ и абсолютной калибровки частотной шкалы. Выбор в пользу использования кюветы системы ICOS в качестве альтернативы многопроходной кюветы Эрио в предыдущей версии спектрометра [15] был сделан из соображений компактности, удобства и надежности системы, а также лучшей устойчивости по отношению к механическим воздействиям.

Для относительной калибровки частоты ДЛ использовался эталон Фабри–Перо с областью свободной дисперсии $D^* = 0.04933$ см⁻¹, который помещался в реперный канал вместо многопроходной кюветы. Временная развертка сигнала, прошедшего через интерферометр, приведена на рис.2 (пунктирная кривая). Спектральное расстояние между соседними максимумами сигнала соответствует области свободной дисперсии эталона D^* . Регист-

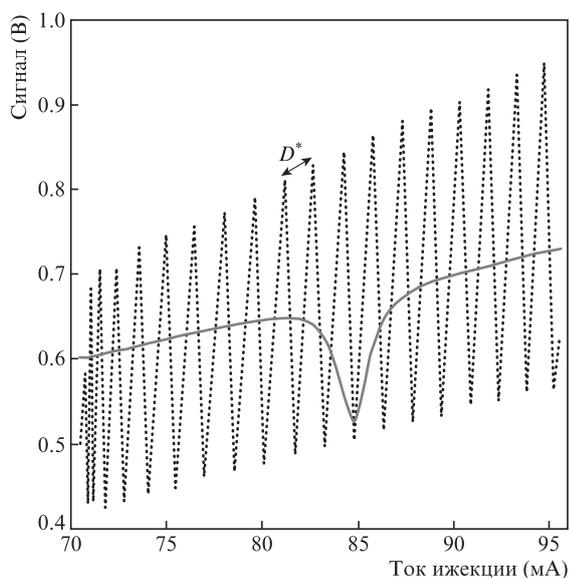


Рис.2. Сигнал излучения диодного лазера на ФП2, прошедшего через многопроходную кювету ICOS (серая кривая) и через интерферометр Фабри–Перо (пунктирная кривая).

рируемый сигнал обрабатывался программным модулем линеаризации, результатом работы которого является перестроенная характеристика, сопоставляющая шкалы тока накачки и частот излучения ДЛ. Наличие этой зависимости позволило компенсировать нелинейность изменения частоты излучения ДЛ при изменении тока накачки.

Сигнал, поступающий в гетеродинный канал, регистрируется с помощью фотодетектора ФП1 и анализируется блоком регистрации сигнала ПЧ, представляющим собой систему, состоящую из серии предусилителей (ПУ) и фильтров с эквивалентным трансимпедансным коэффициентом передачи $r = 10$ МОм и полосой пропускания $B = 0.2 - 10$ МГц. При использовании узкой полосы регистрации ПЧ в гетеродинном режиме отпадает необходимость в анализаторе спектра ПЧ, т.к. в области низких частот спектральная плотность сигнала пропорциональна дисперсии шумов, как было описано в работах [14, 15]. Блок регистрации ПЧ имеет два выхода: выход с первого каскада трансимпедансного усилителя ОУ1, который преобразует фототок в напряжение, и выход после полосового фильтра (комбинация фильтров высоких частот с порогом 0.2 МГц и низких частот с порогом 10 МГц), который выделяет аналитический гетеродинный сигнал, имеющий вид белого шума в ограниченной полосе частот. Сигналы с этих выходов подавались на двухканальный осциллограф RTO 1012 (Rohde & Schwarz) для первоначальной обработки. Сигнал с ОУ1 повторяет форму лазерного импульса и используется лишь для синхронизации осциллографа с измерительной установкой, а сигнал после полосового фильтра является полезным сигналом, содержащим информацию о линии поглощения. Осциллограф преобразует поступающий гетеродинный сигнал в полосу 20 МГц в цифровую форму, возводит его в квадрат и усредняет. Преобразованный таким образом сигнал передается с осциллографа на ПК. Управление осциллографом осуществляется в полуавтоматическом режиме через канал Ethernet с помощью программного обеспечения на основе LabView 12.

Солнечное излучение, прошедшее через атмосферу, вводится в ОВ с помощью специально разработанной системы автоматического слежения за Солнцем (трекера), смонтированной на основе телескопа Sky-Watcher EQ6 PRO SynScan и гид-камеры (ГК) QHY5-II. Она имеет встроенные сервоприводы, управление которыми осуществляется на основе показаний ГК, оснащенной короткофокусным ($f = 3$ мм) объективом и системой нейтральных фильтров, ослабляющих интенсивность падающего солнечного излучения в 10^5 раз. Фильтры используются для того, чтобы избежать повреждения КМОП-матрицы ГК. В системе слежения был установлен микротелескоп (МТ) с плосковыпуклой линзой (диаметр 25.4 мм, $f = 50$ мм) и держателем волоконного разъема FC/APC на одноосной микродвижке ThorLabs. Также в системе был установлен прерыватель оптического сигнала для переключения режимов измерений. Управление трекером осуществлялось посредством программного обеспечения MaxIm DL5 и StarCalc. Хотя описанная система имеет недостатки, такие как большая масса (40 кг) и необходимость калибровки при смене места измерений, ее можно наводить на солнечный диск с точностью 36". Система слежения за Солнцем также претерпела некоторое улучшение в сравнении с предыдущей версией спектрометра, описанной в работе [15]: ранее она работала без ГК, только на основе встроенных сервоприводов, что приводило к снижению точно-

сти наведения и к падению мощности регистрируемого солнечного излучения.

Для управления лазером и реперным каналом используется многофункциональный контроллер ввода-вывода NI USB-6215, управляемый с помощью разработанного авторами программного обеспечения на основе LabView 12. Контроллер представляет собой многофункциональное электронное устройство, включающее в себя восемь аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и два цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) с разрядностью 16 бит и частотой выборки до 250 кГц. В нашем случае в процессе измерений частота выборки составляла 5 кГц. Один канал АЦП и один канал ЦАП использовались для температурной стабилизации ДЛ, один канал ЦАП – для управления током инжекции ДЛ и один канал АЦП – для регистрации сигнала с ФП2 реперного канала. Для снижения сетевых помех установка питается от аккумулятора напряжением 12 В. Прибор, за исключением трекера и осциллографа, собран в компактном кейсе с габаритами 60 × 50 × 23 см и массой не более 10 кг и управляется ноутбуком HP probook 6360b с операционной системой Windows 7 с помощью упомянутого выше программного обеспечения.

Таким образом, лазерное излучение, предварительно настроенное на нужный спектральный диапазон посредством установки температуры ДЛ, распространяется по ОВ, и после ВР1 90% излучения ДЛ поступает в многопроходную кювету, заполненную чистым углекислым газом при низком давлении. В процессе цикла измерений в кювете непрерывно регистрируется линия поглощения CO_2 ($\lambda = 1.605$ мкм), показанная на рис.2 (серая кривая). С помощью специально разработанного алгоритма определяется положение пика поглощения линии на временной шкале и осуществляется коррекция цикла модуляции тока накачки, такая, чтобы линия поглощения располагалась в центре интервала перестройки частоты излучения ДЛ. Далее в соответствии с пропорционально-интегральным законом происходит стабилизация циклов перестройки частоты излучения ДЛ вплоть до достижения заявленной точности 1 МГц. Кроме того, положение пика поглощения в кювете используется для абсолютной калибровки частоты излучения ДЛ.

После прохождения ВР1 излучение ДЛ смешивается с солнечным излучением на одномодовом волоконном разветвителе ВР2 и подается на ФП1. Методика регистрации гетеродинного сигнала ближнего ИК диапазона подробно описана в работе [14], здесь мы приведем лишь основные ее положения. Фототок, возникающий на ФП1, пропорционален поглощаемой мощности падающего на него оптического сигнала, т. е. квадрату напряженности электрического поля. В нашем случае регистрируется смешанный сигнал, состоящий из двух компонент. Тогда фототок на ФП1

$$i = D[|E_{LO}|^2 + (E_{LO}E_S^* + E_{LO}^*E_S) + |E_S|^2], \quad (1)$$

где D – чувствительность ФП; E_{LO} – напряженность электрического поля излучения ДЛ; E_S – напряженность поля, создаваемого широкополосным источником излучения (в нашем случае Солнцем). Первое и последнее слагаемые в (1) соответствуют интенсивностям излучения ДЛ и широкополосного источника. Второе слагаемое в (1) – полезный сигнал ПЧ:

$$E_{LO}E_S^* + E_{LO}^*E_S = 2 \int_0^\infty E_{LO}(\omega)E_S(\omega) \times \exp[-i(\omega_{LO} - \omega)]d\omega + \text{с.с.} \quad (2)$$

В узком спектральном диапазоне в области низких частот (0.2–10 МГц) сигнал ПЧ представляет собой шум со спектральной плотностью $E_{LO}(\omega)E_S(\omega)$. Регистрируемое среднеквадратичное отклонение, пропорциональное спектральной плотности ПЧ, имеет следующий вид:

$$\sigma_{\text{het}} = r \sqrt{2Bi_{LO} \frac{di_S}{d\omega}}, \quad (3)$$

где i_{LO}, i_S – фототоки, обусловленные излучениями ДЛ и Солнца соответственно. Отсюда видно, что для регистрации спектра пропускания атмосферы необходимо от сигнала на выходе ФП1 отделить полезный гетеродинный сигнал ПЧ и обработать его без аппаратных искажений. Функцию отделения сигнала ПЧ выполняет блок регистрации сигнала ПЧ, функцию обработки – осциллограф. Для большей наглядности уместно продемонстрировать процедуру выделения и обработки гетеродинного сигнала при помощи схемы, представленной на рис.3. На рис.3,а приведена форма единичного импульса смешанного излучения с первого выхода блока регистрации ПЧ. После ОУ1 интенсивность сигнала выражается в единицах напряжения и повторяет форму импульса тока инжекции ДЛ, т. е. имеет трапециевидную форму, т. к. оптическая мощность пропорциональна току накачки ДЛ, а фототок пропорционален падающей оптической мощности. Изображенный на рисунке шум – это гетеродинный сигнал, среднеквадратичное отклонение которого меньше амплитуды самого импульса на несколько порядков (напомним, что рис.3 – схематический). На рис.3,б изображен сигнал со второго выхода блока регистрации ПЧ, после ФВЧ, ОУ2 и ФНЧ; это отфильтрованный и усиленный шумовой гетеродинный сигнал, содержащий информацию о линии поглощения CO_2 в атмосфере. На рис.3,в представлен вид сигнала после обработки в осциллографе, т. е. после оцифровки и возведения в квадрат. Наконец, на рис.3,г черной кривой изображен накопленный (усредненный) сигнал, представляющий собой дисперсию шумов гетеродинного сигнала, на котором отчетливо видна линия атмосферного поглощения. Процедура накопления состоит из двух этапов: 50 циклов измерений сигнала ПЧ усредняются осциллографом и затем результат передается на ПК, где происходит усреднение 100 массивов. Таким образом, за один цикл происходит усреднение $N = 5000$ индивидуальных циклов модуляции частоты ДЛ, что занимает около 10 мин с учетом «мертвого» времени на передачу данных с осциллографа на ПК. После обработки гетеродинного сигнала на рис.3,г заметен небольшой наклон кривой дисперсии, который объясняется зависимостью дисперсии шумов ДЛ и фототока от тока накачки ДЛ [14].

Следует отметить, что в предыдущей версии спектрометра [15] процедура обработки сигнала включала аналоговое амплитудное детектирование перед его оцифровкой. Такая процедура может привносить нелинейность при больших токах накачки ДЛ, что приведет к дополнительной неопределенности положения базовой линии и усложнит восстановление интегрального содержания ПГ в атмосфере. Применение цифрового квадратичного де-

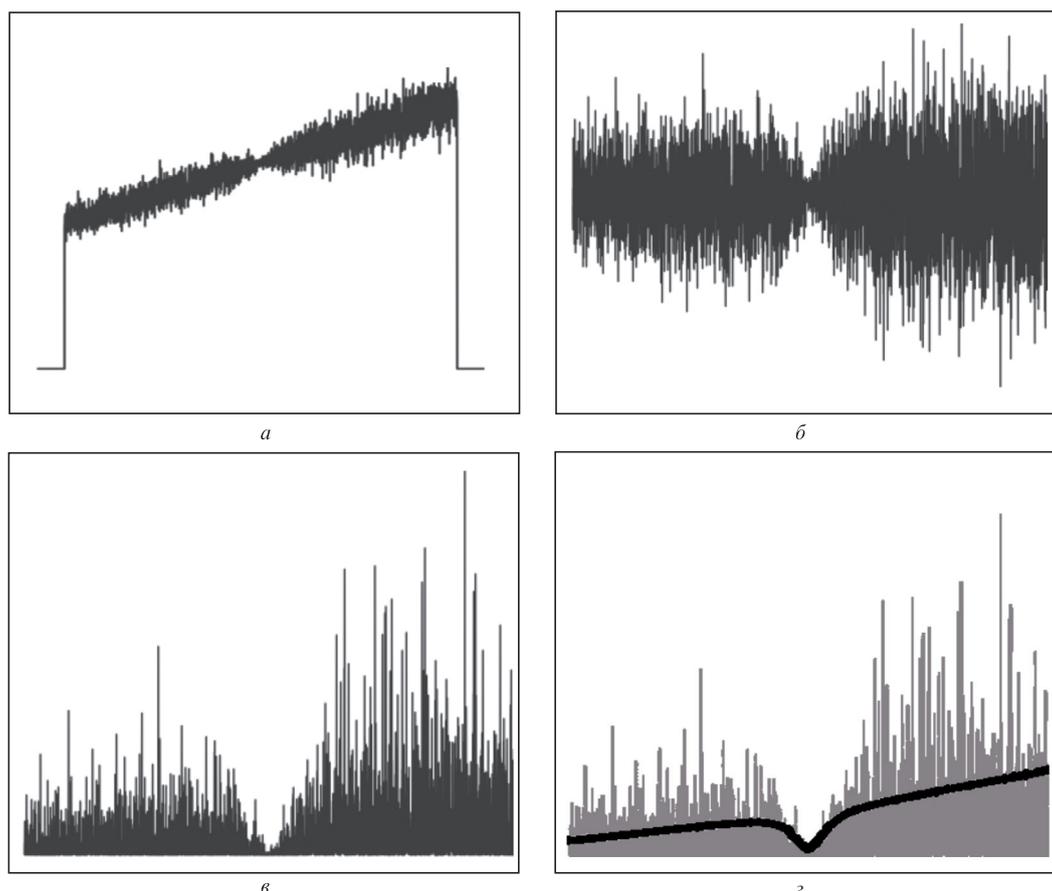


Рис.3. Принципиальная схема выделения и обработки аналитического шумового гетеродинного сигнала: *a* – сигнал с первого выхода блока регистрации сигнала ПЧ (после ОУ1), шумовая компонента, изображенная на фоне основного сигнала – гетеродинный сигнал; *b* – сигнал со второго выхода блока регистрации сигнала ПЧ, т.е. отфильтрованный гетеродинный сигнал; *в* – сигнал после оцифровки и возведения в квадрат (операция выполнялась осциллографом); *г* – усредненная дисперсия шумов (черная кривая) на фоне единичного измерения (серый сигнал).

тектирования значительно облегчило процедуру обработки данных и повысило точность количественных измерений содержания ПГ.

3. Результаты измерений

Измерения спектров атмосферного пропускания проводились 2 августа 2018 г. в г. Долгопрудном на крыше здания, расположенного на территории кампуса МФТИ. Координаты площадки наблюдения: 55.929036° с.ш., 37.521506° в.д., высота над уровнем земли ~ 50 м.

Экспериментальные данные на рис.4,*a* представляют собой дисперсию шумового сигнала ПЧ в зависимости от тока накачки ДЛ. Черная кривая соответствует темновому сигналу, когда прерыватель закрывает вход солнечного излучения в микротелескоп и на ФП1 попадает только излучение ДЛ. Серая кривая соответствует гетеродинному сигналу, когда прерыватель открывает микротелескоп и на ФП1 попадает смешанное излучение. Из рис.4,*a* видно, что дисперсия гетеродинного сигнала превышает дисперсию темнового сигнала. Также можно заметить уменьшение дисперсии шумов сигнала в области токов инжекции ДЛ, соответствующих частотной области линии поглощения CO_2 в атмосфере. Для того чтобы получить гетеродинный сигнал, необходимо вычесть из дисперсии сигнала солнечного излучения дисперсию дробовых шумов ФП1 и собственных шумов блока регистрации сигнала ПЧ, содержащихся в обоих сигналах (рис.4,*б*, черная кри-

вая), и разделить результат на предполагаемый спектральный континуум (базовую линию), т.е. ожидаемый уровень сигнала в отсутствие поглотителя. Для восстановления базовой линии использовался сигнал темнового измерения, из которого вычитался уровень дробовых шумов блока регистрации сигнала ПЧ. После этого сигнал аппроксимировался квадратичным полиномом и нормировался на эмпирически подобранный коэффициент 0.131. Полученная базовая линия изображена на рис.4,*б* (серая кривая). Результирующий спектр пропускания атмосферы в области $6229.8\text{--}6230.6\text{ см}^{-1}$ с полностью разрешенным контуром уединенной вращательной линии колебательно-вращательного спектра CO_2 ($\nu = 6230.227\text{ см}^{-1}$) представлен на рис.4,*в* (черная кривая). Таким образом, суммарное время получения данных для одного спектра пропускания атмосферы, при котором достигается отношение сигнал/шум ~ 100 , составляет 20 мин.

Анализ полученных спектров проводился на основе детального расчета переноса излучения в атмосфере [18]. На исследуемой частоте интенсивность прямого солнечного излучения многократно превышает рассеянную компоненту, поэтому для анализа спектра достаточно воспользоваться законом Бугера–Ламберта–Бера [18]:

$$I(\nu) = I_0 \exp(-\tau(\nu)), \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность вне земной атмосферы; ν – частота.

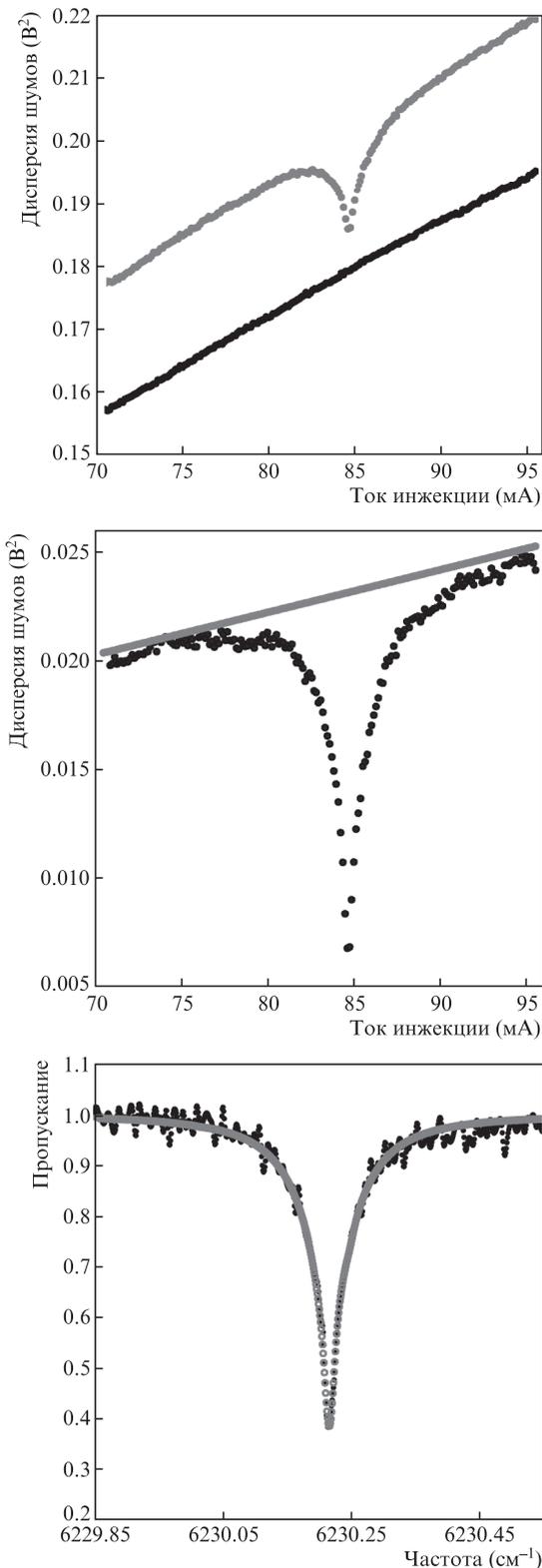


Рис.4. Экспериментальные данные и результаты их обработки: *а* – дисперсия шумов излучения ДЛ в зависимости от его тока инжекции, когда ФП регистрировал только излучение ДЛ (черная линия), и дисперсия шумов солнечного излучения в зависимости от тока инжекции ДЛ, когда ФП регистрировал смешанное излучение (серая кривая); *б* – чистый гетеродинный сигнал (черная кривая) и восстановленная базовая линия, т.е. уровень сигнала в отсутствие поглотителя (серая линия); *в* – результирующий спектр пропускания атмосферы с учетом относительной и абсолютной калибровок (черная кривая) и контур Фойгта, используемый для решения обратных задач (серая кривая).

Оптическая плотность $\tau(\nu)$ определялась методом линейного расчета (line-by-line). Исследуемый спектральный интервал был подобран таким образом, чтобы в нем наблюдался только один газ, а именно CO_2 . Основной вклад вносила линия с центром на частоте 6230.22 см^{-1} , вместе с ней учитывались поглощения линий на частотах $6230.25, 6230.02$ и 6229.98 см^{-1} .

Для сравнения измеренного спектра пропускания атмосферы с результатами моделирования и последующего восстановления концентрации углекислого газа необходимо учесть вертикальную структуру атмосферы. Рассматривались высоты до 50 км от поверхности. Верхняя граница модельной атмосферы была подобрана таким образом, чтобы вклад более высоких слоев составлял менее 0.1% от общего поглощения. Атмосфера считалась плоскопараллельной и горизонтально однородной, состоящей из 100 прилегающих друг к другу слоев, при этом предполагалось, что в каждом модельном слое углекислый газ перемешан равномерно. Оптическая плотность слоя поглощающих молекул на каждой частоте представляет собой сумму сечений поглощения $\sigma_{ij}(\nu)$ для j -й линии, умноженных на концентрацию ρ_i в каждом i -м слое и толщину этого слоя l_i :

$$\tau(\nu) = \sum_j \sum_i \sigma_{ij}(\nu) \rho_i l_i. \tag{5}$$

Параметры спектральных линий были взяты из базы данных HITRAN 2016 [19]. Для определения параметров модели атмосферы (вертикальных профилей температуры и давления) использовались открытые базы данных реанализа ERA-interim [20] и NCEP/NCAR [21]. В расчетах сечения поглощения газа учитывалось как лоренцевское, так и доплеровское уширение линии, для чего частотная зависимость сечения поглощения задавалась контуром Фойгта [18].

Вопрос о восстановлении концентрации ПГ по спектрам высокого разрешения лежит за рамками данной работы, однако здесь необходимо рассмотреть бюджет погрешностей, позволяющий оценить возможности метода. В силу того, что углекислый газ в атмосфере хорошо перемешан, как правило ищется среднее значение его концентрации в столбе атмосферы $X_{\rho\text{CO}_2}$. Если спектр пропускания $\tilde{\tau}(\nu)$ измерен экспериментально, задача о восстановлении концентрации сводится к задаче минимизации невязки модели переноса излучения:

$$\left| \tilde{\tau}(\nu) - \left(\sum_j \sum_i \sigma_{ij}(\nu) \right) X_{\rho\text{CO}_2} \right| \rightarrow \min. \tag{6}$$

Точность восстановления в основном определяется шумами системы и дрейфами прибора, тогда как вклад неопределенностей модели атмосферы и спектральных параметров молекулярного поглощения в результирующую погрешность незначителен. Численные эксперименты по подгонке измеренных спектров модельными показали, что ожидаемая точность определения средних значений концентрации CO_2 составляет $\sim 2 \text{ ppm}$. Для оценки вкладов различных источников погрешностей в измерения был проведен статистический анализ путем вариаций различных параметров (амплитуды шумов прибора, профилей температуры, уровня базовой линии и т. п.) в пределах их неопределенностей и оценки влияния этих вариаций на восстановленное значение концентрации CO_2 . От-

Табл.1.

Источник погрешности	Величина погрешности (%)
Дробовые шумы	0.2
Дрейфы и шумы прибора	0.5
Модель атмосферы	0.1
Базовая линия	0.55

носительные вклады различных источников погрешностей в результаты измерения приведены в табл.1, причем результирующая погрешность оценена в предположении квадратичного вклада всех ее составляющих.

Помимо описанных выше атмосферных и спектральных параметров, необходимо учесть количество поглощающих молекул на трассе наблюдений, определяемое зенитным углом Солнца α_{zen} . Для даты и времени проведения эксперимента (02.08.18, 13:08), результаты которого приведены на рис.4,в, зенитный угол $\alpha_{zen} = 38.2^\circ$. Таким образом, экспериментально измеренная оптическая плотность вычислялась по формуле

$$\tilde{\tau}(v) = -\cos(\alpha_{zen}) \ln(T(v)), \quad (7)$$

где T – коэффициент пропускания, после чего применялся описанный выше алгоритм (6), что привело к среднему значению концентрации $X_{\rho_{CO_2}} = 402.3 \pm 2.2$ ppm.

4. Заключение

Продемонстрированы результаты измерений спектров пропускания атмосферы в области 6229.75–6230.55 см⁻¹ с помощью компактного гетеродинного спектрометра высокого разрешения, работающего в ближнем ИК диапазоне. Получаемые спектры содержат полностью разрешенный контур уединенной вращательной линии колебательно-вращательного спектра поглощения атмосферного CO₂. Полное разрешение контура возможно из-за применения гетеродинной методики приема излучения, использования перестраиваемого диодного лазера с шириной линии генерации 2 МГц и использования реперного канала с кюветой ICOS для стабилизации частоты излучения ДЛ на уровне 1 МГц в окрестности линии. Достигнуто отношение сигнал/шум ~ 100 при времени накопления 10 мин. Представлена процедура обработки спектра пропускания атмосферы и восстановления интегральной концентрации CO₂ в столбе атмосферы с точностью 2.2 ppm, что соответствует требованиям к современным наземным сетям валидации спутниковых данных мониторинга ПГ, однако уступает характеристикам стан-

ций TCCON. Дальнейшие шаги по совершенствованию методики будут заключаться в замене осциллографа цифровой схемой обработки сигнала на основе программируемой логической интегральной схемы, в замене громоздкой системы слежения за Солнцем трекером на основе подвижной стабилизированной платформы с алгоритмом автоматического наведения и в дополнении существующего канала измерения содержания CO₂ каналами для измерения содержания и вертикальных профилей концентраций метана и водяного пара в полосах поглощения с $\lambda = 1.65$ и 1.38 мкм соответственно.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 15-12-20040 (А.В.Родин)) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-24204 (С.Г.Зеневич, М.В.Спиридонов)).

1. Wunch D., Toon G.C., Blavier J.-F.L., et al. *Philos. Trans R. Soc. London, Ser. A*, **369**, 2087 (2011).
2. Gisi M., Hase F., Dohe S., Blumenstock T., Simon A., Keens A. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**, 2969 (2012).
3. Gisi M., Hase F., Dohe S., Blumenstock T. *Atmos. Meas. Tech.*, **4**, 47 (2011).
4. Frey M., Sha M.K., Hase F., et al. <https://www.atmos-meas-tech-discuss.net/amt-2018-146/>
5. Kobayashi N., Inoue G., Kawasaki M., et al. *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 1103 (2010).
6. Hoffmann A., Macleod N.A., Huebner M., Weidmann D. *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 5975 (2016).
7. Stangier T., Sonnabend G., Sornig M. *Remote Sens.*, **5**, 3397 (2013).
8. Wilson E., McLinden M., Miller J., Allan G., Ott L., Melroy H., Clarke G. *Appl. Phys. B.*, **114**, 385 (2014).
9. Clarke G.B., Wilson E.L., Miller J.H., Melroy H.R. *Meas. Sci. Technol.*, **25**, 055204 (2014).
10. Holben B.N., Tanré D., Smirnov A., et al. *J. Geoph. Res. C: Oceans*, **106**, 12067 (2001).
11. Melroy H.R., Wilson E.L., Clarke G.B., et al. *Appl. Phys. B*, **120**, 609 (2015).
12. Wilson E.L. https://www.osapublishing.org/ViewMedia.cfm?uri=CLEO_AT-2016-ATh3J.2&seq=0
13. Wilson E.L., DiGregorio A.J., Riot V.J., et al. *Meas. Sci. Technol.*, **28**, 035902 (2017).
14. Климчук А.Ю., Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я., Шаповалов Ю.П., Родин А.В. *Квантовая электроника*, **42**, 244 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 244 (2012)].
15. Rodin A., Klimchuk A., Nadezhdinskiy A., Churbanov D., Spiridonov M. *Opt. Express*, **22**, 13825 (2014).
16. Siegman A.E. *Appl. Opt.*, **5**, 1588 (1966).
17. Moyer E., Sayres D., Engel G., et al. *Appl. Phys. B*, **92**, 467 (2008).
18. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. *Теоретические основы атмосферной оптики* (СПб.: Наука, 2003).
19. Gordon I.E. et al. *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.*, **203**, 3 (2017).
20. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., et al. *J. R. Met. Soc.*, **137**, 553 (2011).
21. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437 (1996).