

Лидарное зондирование атмосферы с использованием гигаваттных лазерных импульсов фемтосекундной длительности

О.А.Букин, М.Ю.Бабий, С.С.Голик, А.А.Ильин, А.М.Кабанов, А.В.Колесников, Ю.Н.Кульчин, В.В.Лисица, Г.Г.Матвиенко, В.К.Ошлаков, К.А.Шмирко

Приведены результаты зондирования атмосферы в условиях переходной зоны материк–океан гигаваттными фемтосекундными импульсами основной и второй гармоник излучения титан-сапфирового лазера. В режиме многочастотного зондирования (суперконтинуум от основной гармоники) зарегистрированы эмиссионные линии первой положительной системы молекулы азота $V^3\Pi_g - A^3\Sigma_u^+$, а при зондировании излучением второй гармоники показана возможность обнаружения линии комбинационного рассеяния азота ($\lambda = 441$ нм). Отношение интенсивностей линии комбинационного рассеяния азота и линии упругого рассеяния на длине волны $\lambda = 400$ нм составляет 5.6×10^{-4} .

Ключевые слова: лидар, многочастотное зондирование, суперконтинуум, ультракороткие импульсы, атмосфера, упругое рассеяние, комбинационное рассеяние, спектр.

1. Введение

В настоящее время в развитии лидарного зондирования воздушной и водной сред с применением мощных фемтосекундных систем в России принимают участие научные коллективы Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, Дальневосточного федерального университета, а также нескольких институтов РАН: Института прикладной физики РАН (Н.Новгород), Института лазерной физики СО РАН (Новосибирск), Института оптики атмосферы СО РАН (Томск), Института автоматики и процессов управления (ИАПУ) ДВО РАН (Владивосток). В каждом из этих институтов имеется действующая мощная фемтосекундная система гига- и тераваттной мощности [1, 2].

Формально, для работы в этом направлении институты РАН объединяются при выполнении проектов программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» и интеграционного проекта СО РАН–ДВО РАН «Разработка методов фемтосекундного лазерного зондирования атмосферы». В рамках этих проектов проведены циклы теоретических и экспериментальных работ по исследованию процессов формирования филаментов и их характеристик, а также по взаимодействию филаментированных импульсов с различными средами [2–6]: эксперименты по зонди-

рованию атмосферы на коротких атмосферных трассах (Н.Новгород, Новосибирск, Томск); первые эксперименты по зондированию атмосферы фемтосекундными импульсами с использованием эффекта филаментации и генерации суперконтинуума на наклонных атмосферных трассах (Владивосток, Томск); начато накопление базы данных с целью анализа и последующей разработки методик зондирования окружающей среды с использованием мощных фемтосекундных систем.

Специфической особенностью дистанционного зондирования атмосферы с использованием фемтосекундных лазеров является использование излучения суперконтинуума (СК) – феномена спектрального и пространственно-временного уширения мощного сверхкороткого зондирующего импульса. СК сопровождает процесс филаментации исходного импульса: при превышении мощностью импульса известного порога (~ 3.2 ГВт) в зоне взаимодействия становится существенной нелинейная добавка к показателю преломления, наблюдается режим самофокусировки, а затем – процесс филаментации и генерации конической эмиссии СК. Спектральные составляющие СК распределены в конусах с вершиной в точке его генерации. Направление излучения СК совпадает с направлением распространения импульса. Излучение СК наблюдается как в стоксовой (относительно лазерной длины волны), так и в антистоксовой области спектра в диапазоне нескольких спектральных октав. Потери энергии эмиссии СК в сумме не превышают 20%. Таким образом, на трассе зондирования формируется источник излучения импульсов малой длительности с широким спектром и характеристиками, близкими к лазерным.

Для решения прямых и обратных задач зондирования атмосферы, а также для решения задач разработки новых лидарных систем необходима информация о типичных параметрах среды распространения зондирующих филаментированных сверхкоротких импульсов (СКИ): коэффициенте ослабления (линейном и нелинейном) как за счет рассеяния, так и за счет поглощения, индикатрисе рассеяния на атмосферных компонентах, коэффициенте обрат-

О.А.Букин, Ю.Н.Кульчин, К.А.Шмирко. Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5

М.Ю.Бабий, А.В.Колесников. Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690091 Владивосток, ул. Суханова, 8

С.С.Голик, А.А.Ильин, В.В.Лисица. Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690091 Владивосток, ул. Суханова, 8; e-mail: golik_s@mail.ru

А.М.Кабанов, Г.Г.Матвиенко, В.К.Ошлаков. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634021 Томск, пл. Акад. Зуева, 1; e-mail: ovk@iao.ru

Поступила в редакцию 3 марта 2014 г., после доработки – 25 марта 2014 г.

ного рассеяния, лидарном отношении, изменении поляризационных характеристик и др. Необходимую информацию об этих параметрах можно получить и в лабораторных, и в натуральных экспериментах [7–24].

Свечение СК открыло новые возможности для измерения атмосферных параметров методом лидарного зондирования. Уже первые шаги по применению тераваттного фемтосекундного лидара в 90-х гг. прошлого века показали, что при зондировании атмосферы излучением фемтосекундного лазера формируется источник СК, позволяющий осуществлять зондирование до значительных (12–15 км) высот [25–28].

Перспективность использования СК послужила основой для разработки ряда проектов, в том числе международных, включая мобильный вариант фемтосекундного тераваттного лидара Teramobile. В рамках этого проекта в последние два десятилетия разрабатываются современные лидарные системы, решается широкий круг задач атмосферной оптики, накоплен огромный методический опыт [29].

Специфические особенности филаментированного импульса, используемого в качестве импульса зондирующего излучения с широким спектром, потребовали пересмотра основных требований к лидарным системам, методам регистрации лидарных сигналов, уравнению лидарного зондирования [2, 3, 30, 31]. Теоретически можно оценить положение нелинейного фокуса с учетом длины волны излучения, поперечного сечения коллимированного пучка излучения и соотношения между его мощностью и критической мощностью самофокусировки [32]. Экспериментально и теоретически доказана возможность удаленного позиционирования точки филаментации и, следовательно, точки генерации СК. Возможно формирование множества филаментов как в направлении распространения, так и в поперечном сечении пучка излучения [33–37]. В работе [2] предложено условное разбиение трассы зондирования СКИ на начальный участок нелинейного взаимодействия (режим самофокусировки), участок нелинейного взаимодействия (режимы филаментации в зоне нелинейного фокуса и генерации конической эмиссии СК, дефокусировки, самофокусировки) и на линейный участок. Участки самофокусировки и филаментации должны попадать в «мертвую» зону лидара, т. к. здесь за счет уменьшения поперечного сечения пучка реализуются максимальные интенсивности мощного СКИ, превышающие, как правило, предельно допустимые значения для фотоприемных систем.

В настоящей работе обсуждаются результаты зондирования атмосферы по наклонной атмосферной трассе в условиях переходной зоны материк–океан лидарной системой ИАПУ ДВО РАН. Цель экспериментов – определение возможностей зондирования атмосферы в этой зоне фемтосекундным лидаром с гигаваттной мощностью импульсов.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментального комплекса представлена на рис.1. Лидарная система основана на титан-сапфировом лазере 1 (Spitfire XP40F5W, Spectra Physics) с чирпированным двухкаскадным усилением мощности, который генерирует фемтосекундные импульсы излучения длительностью от 40 фс с центральной длиной волны 800 нм, по-

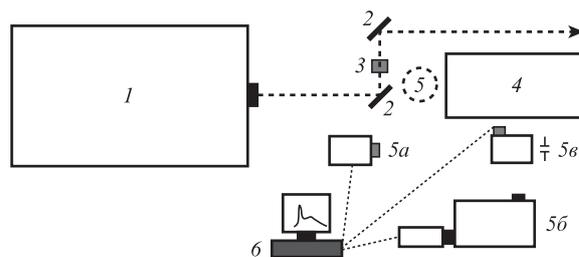


Рис.1. Схема экспериментального комплекса (обозначения см. в тексте).

лушириной спектра до 30 нм, частотой их следования до 1 кГц и средней мощностью до 7 Вт.

В данной конфигурации фемтосекундной лидарной системы генерировались импульсы излучения основной гармоники с энергией до 7 мДж и частотой следования 1 кГц. Лазерное излучение системой зеркал 2 (UFM10R, Thorlabs) направлялось в атмосферу. Для генерации второй гармоники излучения между зеркалами устанавливался кристалл ВВО 3 толщиной 300 мкм, обеспечивающий среднюю мощность 1.2 Вт на центральной длине волны 400 нм при частоте следования лазерных импульсов 1 кГц и начальной длительности импульса основной гармоники лазера 45 фс. Таким образом, мощность зондирующих импульсов превышала 20 ГВт для второй гармоники и не превышала 100 ГВт для основной гармоники титан-сапфирового лазера.

Спектральная зависимость угла расходимости излучения влечет за собой проблему выбора оптимального соотношения технических характеристик лидарной системы: типа системы (коаксиальной/биаксиальной), базы (расстояния между оптическими осями приемной и передающей оптических систем), угла поля зрения (определяемого соотношением между диаметром полевой диафрагмы и фокусным расстоянием телескопа) и его комбинаций с углами расходимости спектральных составляющих СК, типа фоточувствительного приемника.

Учитывая энергетические характеристики зондирующего импульса, мы отдали предпочтение биаксиальной схеме лидара. Это позволило гарантированно исключить сигналы нелинейных взаимодействий (самофокусировки и филаментации) с начальных участков трассы и обеспечить прием обратнорассеянных сигналов СК, включая сигнал на лазерной длине волны, с линейного участка.

Приемная система лидара 4 построена на основе телескопа Шмидта–Кассегрена (C11-SGTXLТ, Celestron Advanced; апертура 279 мм, фокусное расстояние 2800 мм, относительное отверстие 1/10). Во всех экспериментах угол поля зрения приемной системы не превышал 1.5 мрад. Телескоп и последнее поворотное зеркало, передающее зондирующее излучение в атмосферу, размещались на одной платформе. База лидара составляла 23 см. Юстировка лидара осуществлялась изменением угла между оптическими осями приемно-передающей системы и изменением угла зондирования относительно горизонта (наклонное зондирование). Зондирование проводилось через окно лабораторного корпуса с изменением угла зондирования от нуля (в направлении горизонта) до 45°.

Оборудование регистрирующей системы 5 менялось в зависимости от решаемых задач. В первой ее модификации 5a в качестве регистратора использовался ФЭУ (R7400U, Hamamatsu), согласованный с телескопом оптическим волокном диаметром 1 мм, при этом перед оптиче-

ским волокном устанавливались сменные полосовые интерференционные светофильтры (FKB-VIS-10, Thorlabs), обеспечивающие диапазоны длин волн регистрации сигнала 445–455 нм, 495–505 нм, 545–555 нм, 595–605 нм, 645–655 нм, 695–705 нм, 745–755 нм и 795–805 нм (в зависимости от светофильтра). Сигнал с ФЭУ регистрировался быстродействующим АЦП (ADM216×100М (16 бит, 100 МГц) ЗАО «Инструментальные системы»), сопряженным с персональным компьютером 6.

Во второй модификации регистрирующая система 5б состояла из полихроматора (Spectra Pro 2300i, Princeton Instruments; дифракционные решетки 1200, 600 и 300 штр./мм), согласованного с телескопом оптическим волокном (вход со стороны телескопа имеет форму круга диаметром 1 мм, а со стороны монохроматора – форму щели размером 1×0.16 мм), и ICCD-камеры (PI-MAX3:1024i, Princeton Instruments).

В третьей модификации система регистрации 5в состояла из полевой диафрагмы, полихроматора (77480, Newport; дифракционная решетка 300 штр./мм, входная щель шириной 1 мм), шестнадцатиканального ФЭУ (H10515B-04, Hamamatsu) и быстродействующего АЦП (ADM216×100М, ЗАО «Инструментальные системы»).

Для корректного учета молекулярного рассеяния использовались данные аэрологического зондирования [38], проводимого на удалении 5 км от станции зондирования ИАПУ ДВО РАН. Для облегчения анализа результатов лидарного зондирования атмосферы, по аналогии с [39], было введено и использовалось так называемое ослабленное отношение рассеяния

$$R(z) = \frac{\beta_a(z) + \beta_m(z)}{\beta_m} \exp\left[-2 \int_0^z \alpha_a(z) dz\right] = \frac{P(z)}{P_m(z)}, \quad (1)$$

где z – расстояние до зондируемой области; $\beta_a(z)$ и $\beta_m(z)$ – коэффициенты обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния соответственно; $\alpha_a(z)$ – коэффициент аэрозольной экстинкции; $P(z)$ и $P_m(z)$ – лидарные сигналы, обусловленные реальной и молекулярной атмосферой соответственно. Величина $R(z)$ показывает, во сколько раз суммарный лидарный сигнал превышает сигнал, обусловленный только молекулярной атмосферой. С одной стороны, эта величина характеризует аэрозольное состояние атмосферы, а с другой – является показателем качества юстировки лидарной системы: $R(z) \rightarrow 1$ в свободной от аэрозольных частиц области [39, 40].

3. Паспортизация трассы зондирования

Прежде всего рассмотрим результаты эксперимента по определению начального расстояния до области атмосферы, из которой регистрируются сигналы обратного рассеяния зондирующего фемтосекундного импульса. Данный эксперимент важен в связи со спецификой использования фемтосекундного мощного импульса в качестве зондирующего.

Как отмечалось выше, мощный сверхкороткий импульс при распространении в воздухе самофокусируется, при этом реализуются условия для филаментации и генерации СК. После того как «избыточная» энергия импульса израсходована, нелинейные процессы не наблюдаются, т. е. начиная с некоторого расстояния взаимодействие со средой распространения во всем спектральном диапазоне

излучения СК, включая длину волны лазера, приобретает линейный характер. Следовательно, необходимо определить положение на трассе начальной точки зондирования.

В экспериментах, обсуждаемых в данной статье, использовались результаты предварительных лабораторных экспериментов по определению положения точки (участка) филаментации на горизонтальной трассе распространения импульса гигаваттной мощности в зависимости от конфигурации системы зеркал (рис.1). В лабораторных условиях положение точки филаментации зарегистрировано на расстоянии 5–10 м от выходного зеркала 2 при следующих параметрах лазерного излучения: центральная длина волны 800 нм, энергия импульса 6 мДж, его длительность ~50 фс, диаметр пучка 5 мм. Положения точки генерации СК в атмосферных условиях ограничивались расстоянием 5–75 м от выходного зеркала лидара. Нестабильность положения точки генерации СК объясняется условиями натурального эксперимента, отличающимися от лабораторных: зондирование проводилось в направлении естественной морской акватории, как правило при колебаниях температуры и содержания влаги, что изменяло условия взаимодействия СКИ со средой распространения, в частности повышало вероятность множественной филаментации.

Пространственное перераспределение спектральной энергии происходит в конусах с вершиной в точке филаментации по следующему правилу: чем меньше длина волны, тем больше угол при вершине конуса [33]. Ранее нами была получена угловая зависимость для спектральных составляющих филаментированных фемтосекундных импульсов с энергией 10–40 мДж и длительностью 45–50 фс (с субгигаваттной мощностью) в атмосфере в условиях самофокусировки [24]: зарегистрировано излучение СК в диапазоне 300–1100 нм и определены диаметры «спектральных» колец конической эмиссии СК (для длины волны $\lambda_{SC} = 400$ нм половинный угол расходимости составляет 4×10^{-3} рад, для $\lambda_{SC} = 700$ нм – 5×10^{-4} рад, для $\lambda_{SC} = 1100$ нм – 1.2×10^{-4} рад).

В настоящей работе при зондировании атмосферы переходной зоны материк–океан использовалась следующая методика определения начальной точки зондирования (зондирование осуществлялось на длине волны основной гармоники лазера 800 нм при длительности импульса 50 фс, его энергии 5 мДж и начальном диаметре пучка 5 мм). Энергия и длительность импульса, начальное поперечное сечение пучка обеспечивали реализацию нелинейных процессов, филаментацию и генерацию СК. Регистрация обратнорассеянных сигналов проводилась в спектральных интервалах с центрами на длинах волн $\lambda = 793, 775, 757, 739$ и 721 нм (использовалась третья модификация регистрирующей системы – 5в на рис.1). Длина волны 793 нм выбрана как ближайшая (по верхнему допустимому пределу входных потоков излучения для системы регистрации) к лазерной длине волны 800 нм. Время накопления сигнала для интервалов с $\lambda = 793$ и 775 нм составляло 20 мин, для остальных интервалов – 40 мин. Были построены зависимости отношений $F(z, \lambda) = P(z, \lambda)/P(z, \lambda = 793 \text{ нм})$. Если вдоль трассы распространения лазерного излучения происходит процесс самофокусировки пучка и генерации широкополосной конической эмиссии, то данные нелинейные эффекты, проявляющиеся в кольцевой структуре спектрального перераспределения энергии, должны проявляться в увеличении/уменьшении значений функции $F(z, \lambda)$. Если нелинейные эффекты не возникают, то зависимости

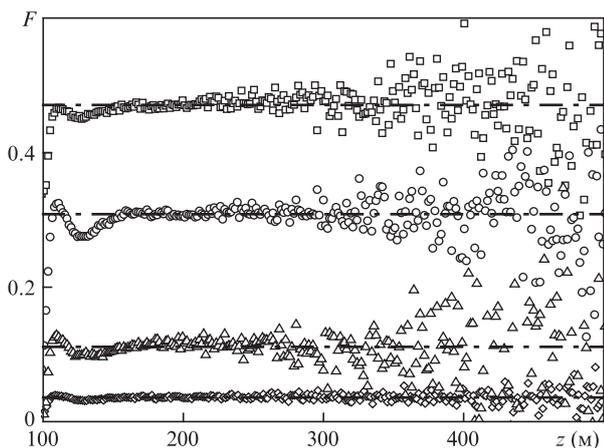


Рис.2. Зависимости отношений $F(z, \lambda)$, полученные при зондировании атмосферы в условиях переходной зоны материк–океан (ноябрь 2013 г.) для $\lambda = 775$ (□), 757 (○), 739 (△) и 721 нм (◇), и их аппроксимации (штрих-пунктирные линии).

$F(z, \lambda)$ для указанных λ будут параллельны друг другу. На рис.2 представлены зависимости $F(z, \lambda)$, полученные при зондировании атмосферы в условиях переходной зоны материк–океан, и их аппроксимации. Зенитный угол трассы зондирования составлял 45° . Из рис.2 следует, что расстояние до области атмосферы, обратнорассеянный сигнал от которой полностью попадал в поле зрения приемной системы, равно ~ 140 м. Видно также, что распространение излучения для указанных длин волн зондирования на расстояния более 140 м осуществляется в линейном режиме, следовательно самофокусировка и филаментация излучения происходят на расстояниях, меньших этой величины. Результаты подобных экспериментов являются основанием для подтверждения линейного характера распространения фемтосекундного импульса в «постфиламентационном» режиме.

4. Одновременное зондирование фемтосекундным (на длине волны второй гармоники лазерного излучения) и наносекундным лидарами

В январе 2014 г. был проведен эксперимент по совместному лидарному зондированию ночной атмосферы лазерными импульсами фемто- (фемтосекундный лидар) и наносекундной (наносекундный лидар) длительности с целью качественного сравнения результатов. В фемтосекундном лидаре использовалась вторая гармоника лазерного излучения ($\lambda = 400$ нм) и третья модификация регистрирующей системы (5в на рис.1). В качестве наносекундного лидара использовался многочастотный лидар ИАПУ ДВО РАН [40, 41]. На рис.3 представлены вертикальные профили ослабленного отношения рассеяния $R(z)$ для случаев зондирования импульсами излучения нано- (на $\lambda = 355$ нм) и фемтосекундной (на $\lambda = 400$ нм) длительности. Видно, что зависимости $R(z)$ для этих двух случаев практически одинаковы. Небольшие различия связаны с различием конфигураций приемно-передающей системы, а также со спектральной зависимостью коэффициентов обратного рассеяния и экстинкции для молекулярной и аэрозольной компонент атмосферы, которые также влияют на отношение $R(z)$.

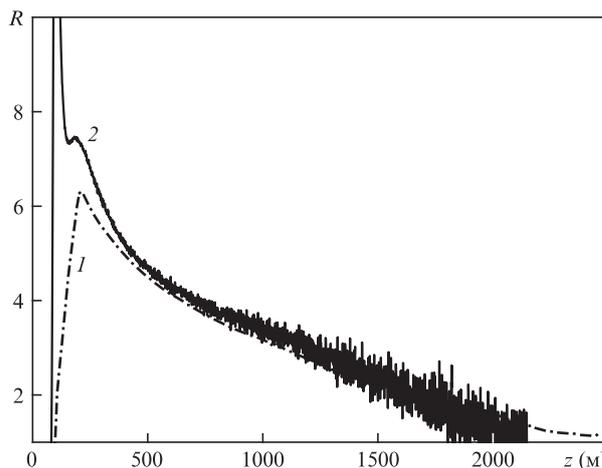


Рис.3. Вертикальные профили $R(z)$ для импульсов лазерного излучения нано- (1) и фемтосекундной (2) длительности.

5. Лидар упругого рассеяния

Регистрация сигнала упругого обратного рассеяния основной гармоники излучения титан-сапфирового лазера ($\lambda = 800$ нм) проводилась с использованием первой модификации регистрирующей системы (5а на рис.1) (полоса пропускания светофильтра 795–805 нм). Энергия лазерного импульса составляла 6 мДж, его длительность – 45 фс, а диаметр пучка равнялся 10 мм. Высота полного вхождения лазерного излучения в поле зрения приемной системы составила 900 м, что согласуется с данными расчетов (~ 800 м) [39]. Зондирование проводилось по наклонной трассе с зенитным углом 65° , время накопления сигнала было равно 20 мин при частоте следования лазерных импульсов 1 кГц. На рис.4 приведены вертикальные профили ослабленного отношения рассеяния $R(z)$. Отношение сигнал/шум для сигналов с начальных участков трассы зондируемой области на 11 км от лидара. Применение классических схем расчета [2] совместно с алгоритмами фильтрации и сглаживания [39] обеспечивает уверенное восстановление коэффициентов аэрозольного обратного рассеяния с погрешностью не более 15%.

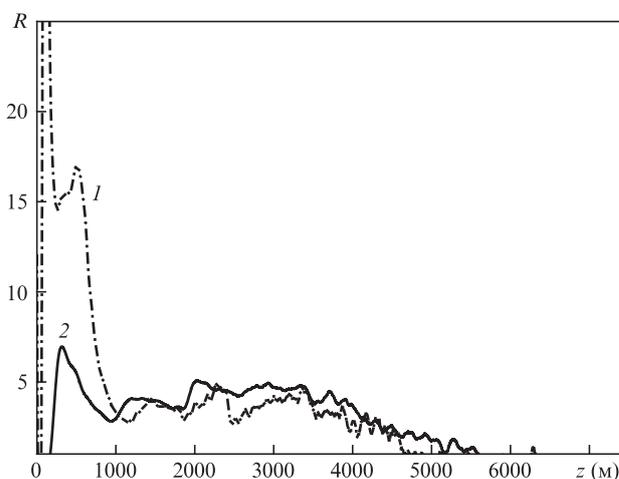


Рис.4. Вертикальные профили $R(z)$, полученные при приеме сигнала из ближней (1) и дальней (2) зон. Длина волны лазерного излучения 800 нм, зенитный угол 65° .

На рис.4 отчетливо просматривается внутренняя структура планетарного пограничного слоя до его границы на высоте 4000 м, где величина сигнала аэрозольного рассеяния начинает уменьшаться до величины сигнала молекулярного рассеяния. Изменение параметров юстировки лидара с целью корректного приема сигнала из ближней зоны не приводит к существенному изменению формы сигнала обратного рассеяния, изменяется только расстояние до области атмосферы, от которой обратнорассеянное лазерное излучение полностью попадает в поле зрения приемной системы.

Учитывая современную область применения аэрозольных лидаров, основанную на их способности определять высоту и тип рассеивающего слоя (облако или аэрозоль), коэффициент аэрозольной экстинкции или обратного рассеяния, вертикальную протяженность слоя, структуру и динамику планетарного пограничного слоя [40, 41], а также результаты описанных в этом разделе экспериментов, можно констатировать перспективность применения рассматриваемого лидара для исследования таких структурных элементов тропосферы, как планетарный пограничный и аэрозольные слои.

6. Многочастотное зондирование

Для исследования эффективности восстановления газового состава атмосферы в переходной зоне материк–океан с использованием развиваемой методики многочастотного лидарного зондирования лазерными УКИ был проведен анализ полученных в эксперименте спектров обратного рассеяния на наличие эмиссионных линий газового состава атмосферы, а также линий комбинационного рассеяния атмосферных газов.

В этом эксперименте использовалась система регистрации широкополосного сигнала со стробированием (5б на рис.1) путем изменения задержек регистрации сигнала ICCD-камерой. Запись первого (по времени) спектра соответствовала расстоянию 75 м от детектора, а временная задержка для каждой последующей записи спектра – расстоянию 28.5 м.

На рис.5 представлены спектры сигнала обратного рассеяния, полученные с различных участков атмосферной трассы (для наглядности приведены «прореженные» спектры). Энергия лазерного импульса составляла 6 мДж, его длительность – 45 фс, а диаметр пучка был равен 10 мм. Из рис.5, б и в видно, что в спектрах на фоне СК (широкополосного непрерывного излучения) выделяются узкие линии на длинах волн 752, 760, 775, 815 и 847 нм со значительно меньшими интенсивностями, чем интенсивность линии основного лазерного импульса. По нашей оценке, данные линии соответствуют первой положительной системе молекулы азота $V^3\Pi_g - A^3\Sigma_u^+$. Интересно отметить, что ранее подобные спектры были зарегистрированы нами при наблюдении оптического пробоя на поверхности морской воды под действием лазерного импульса фемтосекундной длительности [42, 43].

7. Восстановление профиля коэффициента аэрозольной экстинкции

На рис.6 приведен пример восстановления профилей коэффициентов аэрозольной экстинкции α_a для лазерной длины волны 800 нм и для длин волн 780 и 830 нм (выборка из спектрограмм лидарных сигналов СК). Восстанов-

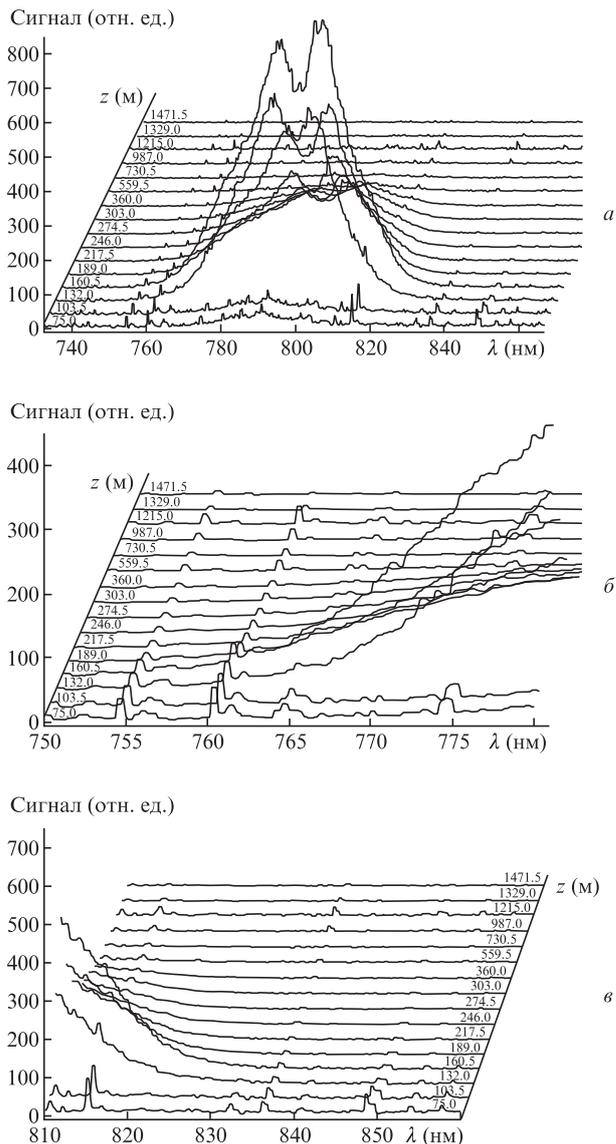


Рис.5. Спектр сигнала обратного рассеяния (а) и его антистоксова (б) и стоксова (в) области.

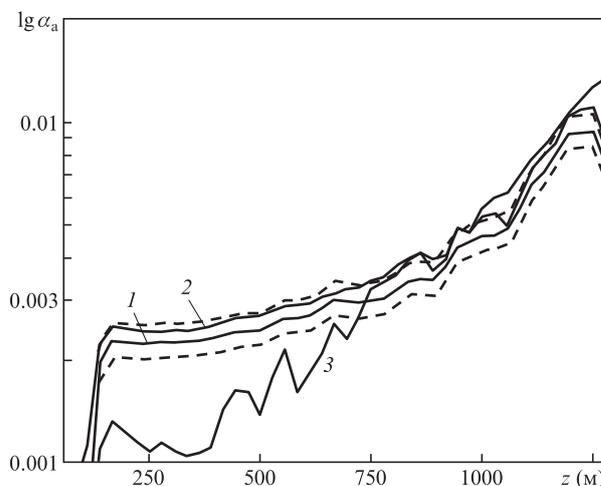


Рис.6. Вертикальные профили коэффициента аэрозольной экстинкции α_a (в m^{-1}) для длин волн 800 (1), 780 (2) и 830 нм (3). Штриховые кривые – профили $\alpha_a \pm 3\sigma$ для длины волны 800 нм.

ление проводилось по методу Клетта с учетом положения точки филаментации на трассе зондирования [2]. Для лазерной длины волны указан «коридор» значений $\alpha_a \pm 3\sigma$. Из сопоставления приведенных на рис.6 зависимостей видно, что коэффициенты аэрозольной экстинкции для близких длин волн (780 и 800 нм) практически совпадают. Коэффициент экстинкции для длины волны 830 нм (близкой к длине волны линии поглощения H_2O) практически совпадает с таковым для длины волны 800 нм, начиная с высоты ~ 700 м, что соответствует оценке высоты слоя дымки по данным лидара упругого рассеяния.

8. Регистрация сигналов комбинационного рассеяния азота

Для исследования возможностей лидара комбинационного рассеяния с использованием лазерных импульсов фемтосекундной длительности с центральной длиной волны излучения 400 нм между зеркалами (2 на рис.1) устанавливался кристалл ВВО толщиной 300 мкм (3 на рис.1). В результате было получено излучение на центральной длине волны 400 нм с полушириной спектра ~ 5 нм, энергией импульса 1.2 мДж, частотой следования импульсов 1 кГц и начальным диаметром пучка 10 мм. Регистрация осуществлялась с использованием второй модификации регистрирующей системы (5б на рис.1).

На рис.7 представлен результат медианной фильтрации усредненного по 200 измерениям спектра лидарного сигнала с диапазона высот 75–2000 м. Измерения проводились с 30-минутным накоплением сигнала при частоте следования лазерных импульсов 1 кГц. На вставке к рис.7 показана область спектра в увеличенном по оси ординат масштабе, соответствующая линии комбинационного рассеяния азота. После аппроксимации пиков упругого рассеяния лазерного излучения и сигнала комбинационного рассеяния азота методом наименьших квадратов получено отношение интенсивности линии комбинационного рассеяния азота I_{CS} к интенсивности I_0 пика, обусловленного упругим рассеянием лазерного излучения, равное 5.6×10^{-4} , что близко к литературным данным: согласно [39] отношение сечений комбинационного и упругого рассеяний составляет $\sim 10^{-3}$.

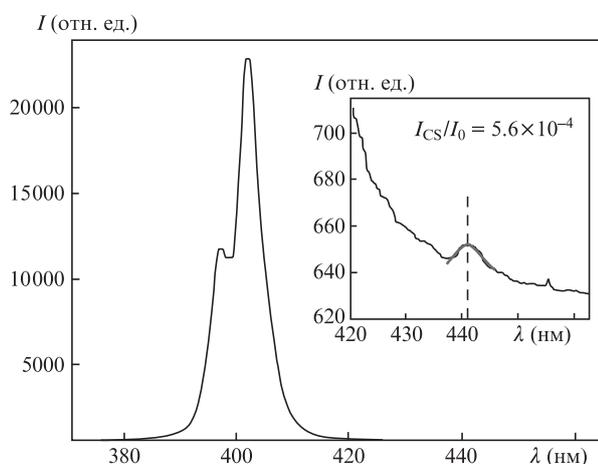


Рис.7. Спектр лидарного сигнала с диапазона высот 75–2000 м. На вставке – область спектра, соответствующая линии комбинационного рассеяния азота (положение ее максимума указано вертикальной штриховой линией).

9. Заключение

В результате выполненных экспериментов по зондированию атмосферы фемтосекундным лидаром с импульсами гигаваттной мощности определены возможности проведения исследований газового и аэрозольного составов атмосферы. Установлено, что:

1) при рассматриваемой конфигурации лидарной системы нелинейные эффекты происходят в «мертвой» зоне приемной системы (на расстояниях до 140 м), а дальше излучение распространяется в линейном режиме;

2) результаты зондирования фемто- и наносекундным лидарами находятся в хорошем соответствии, что подтверждает предположение о линейности распространения «постфиламентационного» фемтосекундного излучения в атмосфере;

3) использование разработанного устройства в качестве лидара упругого рассеяния на длине волны 800 нм позволяет уверенно получать сигнал с расстояний до 11 км;

4) в спектрах обратного рассеяния зондирующих филаментированных фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны лазерного излучения 800 нм можно различить эмиссионные линии первой положительной системы молекулы азота $\text{V}^3\Pi_g - \text{A}^3\Sigma_u^+$;

5) при использовании в экспериментах второй гармоники излучения титан-сапфирового фемтосекундного лазера можно зарегистрировать линию комбинационного рассеяния азота ($\lambda \approx 441$ нм); отношение интенсивностей этой линии и линии упругого рассеяния на длине волны 400 нм составляет 5.6×10^{-4} .

Полученные результаты и формирующаяся методика проведения экспериментов по зондированию окружающей среды мощными фемтосекундными лидарами положены в основу планируемых экспериментов на фемтосекундном атмосферно-оптическом стенде ИОА СО РАН с использованием системы, генерирующей импульсы излучения тераваттной мощности (с энергией 100–150 мДж, длительностью 50 фс и частотой следования 10 Гц) основной и второй гармоник титан-сапфирового лазера (работчик – Авеста-Проект, Троицк).

Отметим, что результаты экспериментов послужили основой для уверенных выводов о выходе российских исследователей на уровень лидарного зондирования атмосферы мощными сверхкороткими импульсами.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения», интеграционного проекта СО РАН–ДВО РАН «Разработка методов фемтосекундного лазерного зондирования атмосферы» и РФФИ (гранты № 12-05-00716-а и 12-02-31714_мол_а).

1. Бабий А.А., Киселев А.М., Сергеев А.М., Степанов А.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 623 (2001).
2. Аексимов Д.В. и др. *Фемтосекундная атмосферная оптика* (Новосибирск: изд-во СО РАН, 2010).
3. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. *Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы* (Томск: изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2010).
4. Ильин А.А., Голик С.С. *Письма в ЖТФ*, **40** (1), 3 (2014).
5. Креков Г.М., Матвиенко Г.Г. *Оптика атмосферы и океана*, **23**, 835 (2010).
6. Букин О.А., Павлов А.Н., Салюк П.А., Голик С.С., Ильин А.А., Бубновский А.Ю. *Оптика атмосферы и океана*, **23**, 926 (2010).

7. Geints Yu.E., Kabanov A.M., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Zemlyanov A.A., Golik S.S., Bukin O.A. *Opt. Lett.*, **35**, 2717 (2010).
8. Geints Yu.E., Kabanov A.M., Zemlyanov A.A., Vykova E.E., Bukin O.A., Golik S.S. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 181114 (2011).
9. Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Vykova E.E., Apreksimov D.V., Bukin O.A., Sokolova E.B., Golik S.S., Ilyin A.A. *Appl. Opt.*, **50**, 5291 (2011).
10. Golik S.S., Bukin O.A., Il'in A.A., Sokolova E.B., Kolesnikov A.V., Babiy M.Yu., Kul'chin Yu.N., Gal'chenko A.A. *J. Appl. Spectrosc.*, **79**, 471 (2012).
11. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. *Оптика атмосферы и океана*, **23**, 749 (2010).
12. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. *Оптика атмосферы и океана*, **23**, 757 (2010).
13. Пономарев Ю.Н., Уогинтас С.Р. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 654 (2013).
14. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **22**, 119 (2009).
15. Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н., Бодров С.Б., Захаров Н.С., Холод С.В. *Оптика атмосферы и океана*, **22**, 332 (2009).
16. Апецсимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Землянов Ал.А., Ильин А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Соколова Е.Б. *Оптика атмосферы и океана*, **23**, 536 (2010).
17. Апецсимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Степанов А.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **23**, 1006 (2010).
18. Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Ильин А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Соколова Е.Б. *Оптика атмосферы и океана*, **24**, 351 (2011).
19. Киселев А.М., Пономарев Ю.Н., Степанов А.Н., Тихомиров А.Б., Тихомиров Б.А. *Квантовая электроника*, **41**, 976 (2011).
20. Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Ильин А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Соколова Е.Б., Хабибуллин Р.Р. *Оптика атмосферы и океана*, **24**, 648 (2011).
21. Апецсимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Петров А.В. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 974 (2013).
22. Апецсимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 247 (2013).
23. Апецсимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Голик С.С., Землянов А.А., Ильин А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 1029 (2013).
24. Иглакова А.Н., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Прокопьев В.Е., Тимофеев В.И. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 969 (2013).
25. Woste L., Wedekind C., Wille H., Rairoux P., Stein B., Nikolov S., Werner Ch., Niedermeier S., Schillinger H., Sauerbrey R. *Laser und Optoelektronik*, **29**, 51 (1997).
26. Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. *Opt. Lett.*, **20**, 73 (1995).
27. Méjean G., Kasparian J., Salmon E., Yu J., Wolf J.-P., Bourayou R., Sauerbrey R., Rodriguez M., Wöste L., Lehmann H., Stecklum B., Laux U., Eisloffel J., Scholz A., Hatzes A.P. *Appl. Phys. B*, **77**, 357 (2003).
28. La Fontaine B., Vidal F., Jiang Z., Chien C.Y., Comtois D., Desparois A., Johnson T.W., Kieffer J.-C., Pepin H. *Phys. Plasmas*, **6**, 1615 (1999).
29. *Publications of the Teramobile Project*; <http://www.teramobile.org/publis.html>.
30. Faye G., Kasparian J., Sauerbrey R. *Appl. Phys. B*, **73**, 157 (2001).
31. Гордиенко В.М., Холодных А.И., Прялкин В.И. *Квантовая электроника*, **30**, 839 (2000).
32. Marburger J.H. *Prog. Quantum Electron.*, **4**, 35 (1975).
33. Кандидов В.П., Голубцов И.С., Косарева О.Г. *Квантовая электроника*, **34**, 348 (2004).
34. Кандидов В.П., Шлёнов С.А., Косарева О.Г. *Квантовая электроника*, **39**, 205 (2009).
35. Кандидов В.П., Шленов С.А., Силаева Е.П., Дергачев А.А. *Оптика атмосферы и океана*, **23**, 873 (2010).
36. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. *Оптика атмосферы и океана*, **23**, 274 (2010).
37. Geints Y.E., Bulygin A.D., Zemlyanov A.A. *Appl. Phys. B*, **107**, 243 (2012).
38. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
39. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. *Лазерное зондирование средней атмосферы* (Томск: РАСКО, 2002).
40. Букин О.А., Кульчин Ю.Н., Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А. *Оптика атмосферы и океана*, **25**, 694 (2012).
41. Павлов А.Н., Шмирко К.А., Столярчук С.Ю. *Оптика атмосферы и океана*, **25**, 968 (2012).
42. Ильин А.А., Букин О.А., Соколова Е.Б., Голик С.С., Шмирко К.А. *Оптика атмосферы и океана*, **25**, 441 (2012).
43. Ilyin A., Golik S. *Spectrochim. Acta, Part B*, **87**, 192 (2013).