

Оценка эффективности использования перспективных лидаров белого света для зондирования микрофизических параметров слоистой облачности: 1. Аналитический обзор

Г.М. Креков, М.М. Крекова, А.Я. Суханов*

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

Поступила в редакцию 16.10.2008 г.

Представлен аналитический обзор существующих и перспективных источников широкополосного когерентного излучения с позиций их значимости в проблеме дистанционного лазерного зондирования окружающей среды и, в первую очередь, земной атмосферы. Отмечается стремительное развитие технологии производства оптоволоконных лазеров и усилителей. Сделан вывод о том, что оптоволоконная техника займет в ближайшее время лидирующие позиции в конструировании лидарных систем, в первую очередь аэрокосмического базирования. Это делает актуальным разработку методологии и алгоритмического обеспечения для интерпретации данных, получаемых при широкополосном лазерном зондировании.

Ключевые слова: волоконно-оптические лазеры, широкополосное излучение, лазерное зондирование.

Введение

Во второй половине 90-х гг. эксперименты с излучением фемтосекундных лазеров на Ti:Sa мощностью около 50 ГВт привели к открытию явления устойчивой локализации световой энергии в узкой протяженной области диаметром примерно 100 мкм [1–3]. Эта область локализации, имеющая характер прерывистой светящейся нити, получила название филамента. Вокруг филамента возникает слаборасходящееся излучение конической эмиссии с непрерывным спектром в полосе 0,5–0,8 мкм. В результате дальнейших исследований [2–5] было обнаружено, что при определенных режимах генерации излучения и фокусировки пучка с увеличением пиковой мощности импульсов более 2 ТВт филаментация возникает спорадически во множестве точек сечения пучка, что приводит к образованию стабильного суперконтинуума излучения (СК). Состояние стабильности и протяженность СК, достигающая нескольких десятков метров, существенно определяются режимом турбулентности атмосферного воздуха [6, 7]. Приставка «супер» отмечает тот факт, что спектральная полоса излучения необычайно расширяется.

В работе [8] излучение СК зарегистрировано в области 0,5–4,5 мкм. По краям полосы спектральная интенсивность быстро падает. Сохраняется высокая, не более 0,8 рад, направленность излучения белого света. Новые качества вторичного

широкополосного импульсного излучения расширили возможности его применения для дистанционного зондирования окружающей среды [9, 10].

Уже первые предварительные результаты применения лидаров белого света (ЛБС) [10] показали их перспективность для зондирования атмосферы до высот 12–15 км. Сочетание возможностей ЛБС и Фурье-спектроскопии высокого разрешения [10, 11] открыло путь более эффективного подхода к решению традиционных проблем лидарного зондирования. ЛБС позволяют по-новому посмотреть на задачу многочастотного зондирования микрофизических параметров аэрозольных частиц и в первую очередь отказаться от эксплуатации громоздких, сложных в управлении мультилидарных систем [12, 13]. Появляется возможность оптимального выбора длин волн зондирования, информативных для данного класса метеорологических объектов [13, 14].

В работах [14, 15] показана принципиальная возможность дистанционного определения спектра по размерам аэрозольных частиц с регистрацией сигнала обратного рассеяния суперконтинуума на 3–4 длинах волн видимого участка спектра. Однако при этом появляется ряд специфических вопросов, связанных с недостаточным информативным содержанием сигналов белого света относительно грубодисперсной фракции аэрозоля и большинства гидрометеоров [16]. В этой связи нам представляется целесообразным оценить потенциальные возможности нового поколения импульсных лазерных источников широкополосного излучения, генерирующих в ближнем ИК-диапазоне волн.

* Георгий Михайлович Креков (gm@iao.ru); Маргарита Матвеевна Крекова; Александр Яковлевич Суханов.

1. Тенденции развития фемтосекундной лазерной техники ИК-диапазона волн

Проблема создания эффективных широкополосных когерентных источников излучения инфракрасного диапазона волн является актуальной в течение последних десятилетий ввиду развивающихся потребностей медицинской томографии, атмосферной оптики, телеметрии и др. Отсутствие до недавнего времени стабильных лазерных материалов, позволяющих получать управляемые непрерывные спектры излучения ИК-диапазона, стимулировало развитие техники нелинейного параметрического преобразования излучения лазеров видимого участка спектра и в первую очередь Ti:Sa-лазера [17–21], остающегося наиболее распространенным генератором фемтосекундных импульсов. В частности, использование оптико-параметрического усилителя на нелинейных кристаллах β -BaB₂O₄ (BBO), BiB₃O₆ (BIBO) и LiB₃O₅ (LBO) обеспечивает эффективное преобразование фемтосекундного излучения на длине волны 0,8 мкм в область спектра 1,1–2,5 мкм [24, 25]. Дальнейшее преобразование на основе выделения разностных частот с помощью кристалла AgGaS₂ позволяет расширить диапазон генерации ИК-излучения в область 2,4–12,0 мкм [18].

Для генерации импульсов среднего ИК-диапазона 2,0–4,0 мкм обычно используются КTiOPO₄ (КТР)-кристаллы [24]. Новые технологии связаны с использованием неколлинеарной геометрии радиационного взаимодействия в кристаллах ниобата лития (LiNbO₃) и MgO:(LiNbO₃), обеспечивающих эффективное частотное преобразование ультракоротких импульсов длительностью 50,0–120 фс в спектральной области около 3,0 мкм. Подобные генераторы, несмотря на достаточно скромные энергетические возможности, уже используются в системах лидарного мониторинга [19, 20]. Однако, как отмечается, например в [22], повышенные технологические требования к лазеру накачки Ti:Sa-лазера приводят к необходимости использования дорогостоящих систем (Millenia, Spectra-Physics или Verdi, Coherent Radiation). При этом по-прежнему трудно обеспечить стабильную работу лазера в течение нескольких недель или даже дней, что является одним из основных требований к современным метрологическим устройствам и лидарным системам. В связи с этим в ряде работ, в частности [23, 26, 27], интенсивно исследуются возможности перехода к волоконным лазерам, активированным атомами редкоземельных элементов (РЗЭ). В таблице по данным [28] приведена сводка ионов РЗЭ, используемых для активации твердотельных лазеров.

В коммерческих лазерах, как правило, в качестве активаторов используются Nd³⁺ и Yb³⁺, в усилителях — Er³⁺ [28]. В настоящее время наилучшие технологические показатели достигаются в волноводах, активированных комплексом ионов, напри-

мер Er³⁺/Yb³⁺ [23]. За последние несколько лет выходная мощность лучших образцов волоконных РЗЭ-лазеров увеличилась более чем на порядок, достигнув 2 кВт. Нарастающие энергетические показатели волоконных РЗЭ-лазеров, их компактность, надежность в эксплуатации и малая энергоемкость делают их конкурентоспособными при разработке перспективных лидарных систем, в том числе аэрокосмического базирования [30–33].

Перечень ионов (РЗЭ), нашедших применение для активации твердотельных лазеров и усилителей

Ион	Активируемая среда	Область эмиссии, мкм
Neodymium (Nd ³⁺)	YAG, YVO ₄ , YLF,	1,03–1,1
	кварц	0,9–0,95
Ytterbium (Yb ³⁺)	YAG,	1,32–1,35
	фосфатное стекло, кварц	1,0–1,1
Erbium (Er ³⁺)	YAG, кварц	1,5–1,6
		2,7
Thulium (Tm ³⁺)	YAG, кварц, фторидное стекло	0,55
		1,7–2,1
		1,45–1,53
Holmium (Ho ³⁺)	YAG, YLF, кварц	0,48
		0,8
Praseodymium (Pr ³⁺)	кварц, фторидное стекло	2,1
		2,8–2,9
		1,3
Cerium (Ce ³⁺)	YLF, LiCAF, LiLuF, LiSAF	0,635
		0,6
		0,52
		0,49
		0,28–0,33

При совместном использовании техники удвоения частот, параметрической перестройки частот и явления суперконтинуума открывается возможность создания многоцелевого фемтосекундного лазерного источника, способного решать широкий круг задач прикладной спектроскопии и дистанционного зондирования. В работе [29] принципиально обоснована методическая схема генерации широкополосного излучения в спектральной области 0,5–2,0 мкм на основе Erbium (Er³⁺)-лазера.

Последние годы характеризуются стремительным развитием нового научного направления, связанного с разработкой и применением фемтосекундных лазеров — фемтосекундной нанофотоники. За короткий отрезок времени показана и реализована возможность целенаправленного изменения свойств вещества и управления фундаментальными (в том числе сверхбыстрыми) радиационными процессами путем наноструктурирования оптических материалов, создания надмолекулярных структур и молекулярных агрегатов [20, 34–36].

Разработка новых органических материалов с повышенными нелинейными свойствами, оптических материалов и структур позволяет создавать высокоэффективные устройства для преобразования частоты, получения СК и управления параметрами его излучения. Достигнутый уровень техноло-

гии фотонно-кристаллических световодов [37, 38] допускает генерацию СК в спектральных областях видимого и ИК-излучения со спектральной шириной до нескольких сотен нанометров. Микроструктурированные (МС) оптические волокна — это световоды нового типа, отличающиеся по своей архитектуре, принципу действия и свойствами от обычных волокон. Являясь одним из наиболее значительных достижений лазерной физики, МС-волокна открывают широкие возможности оптики сверхкоротких импульсов, оптической метрологии, лазерной биомедицины и дистанционного зондирования окружающей среды [37, 38].

2. Основные физические механизмы генерации СК в МС-волокнах

Основные физические механизмы эффективной генерации суперконтинуума в МС-волокнах связаны с комплексом нелинейно-оптических явлений, возникающих по мере нарастания пиковой мощности лазерного излучения: фазовая самомодуляция (ФСМ), вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), четырехволновое взаимодействие (ЧВВ), пространственное самовоздействие, образование ударного фронта огибающей импульса, модуляционные неустойчивости и эффекты дисперсии высших порядков. Первые успешные демонстрации СК в фотонно-кристаллических световодах выполнены в работе [39], хотя реальные проявления ФСМ, связанные зависимостью коэффициента преломления силикатного стекла от интенсивности пропущенного излучения $I(t)$ (нелинейность Керра), отмечались в ранних исследованиях Альфано и др. (систематизированы в [35]). При этом нелинейная часть коэффициента преломления Δn приводит к смещению фазы светового импульса $\Delta\varphi_{nl}$:

$$\Delta\varphi_{nl}(z,t) = \Delta n \frac{\omega}{c} z = n_2 \frac{\omega}{c} I(t)z, \quad (1)$$

где $I(t)$ — интенсивность излучения; $n_2 = (2\pi/n)^2 \chi^{(3)}(\omega; \omega, \omega, -\omega)$ — нелинейный показатель преломления оптического материала на частоте ω ; $\chi^{(3)}(\omega; \omega, \omega, -\omega)$ — нелинейно-оптическая восприимчивость среды 3-го порядка; n — показатель преломления среды в отсутствие излучения; z — путь импульса в среде; c — скорость света в вакууме; t — время.

Соответствующий частотный сдвиг определится как [35]:

$$\Delta\omega(z,t) = -\frac{d}{dt} \Delta\varphi_{nl}(z,t) = -n_2 \frac{dI(t)}{dt} \frac{\omega}{c} z. \quad (2)$$

Гауссова неоднородность интенсивности лазерного пучка стимулирует образование нелинейной линзы, $n(r) = n + n_2 I(r)$ (r — поперечная координата), которая приводит к самофокусировке пучка. Рост интенсивности на оси пучка в условиях ФСМ нарушает в конце концов динамическую устойчивость лазерного поля, приводя к его распаду на тонкие нити — филаменты. Филаментация ультра-

коротких импульсов сопровождается генерацией суперконтинуума, который, в свою очередь, способствует дальнейшему усилению эффекта ФСМ.

Необходимость обеспечения высокой плотности энергии накачки, порядка $10 \text{ ТВт}/\text{см}^2$, накладывает серьезные ограничения в плане создания в сплошных средах стабильных СК, пригодных, скажем, для целей рутинного дистанционного зондирования. Переход к волоконной оптике позволяет использовать то физическое обстоятельство, что, как следует из (2), условия и масштабы спектрального уширения зависят не только от величины $dI(t,z)/dt$, но и от геометрической протяженности объема, в котором происходит нелинейное взаимодействие излучения с веществом.

Как отмечено, например, в работе [37], дисперсионная длина z для пикосекундного импульса на длине волны $\lambda = 0,53 \text{ мкм}$ в коммерческом МС-волокне SMF-28 составляет около 80 м, что на 4 порядка больше, чем в первых опытах Альфано [35] на боросиликатном стекле. Соответственно до уровня нескольких киловатт снижается необходимая для генерации СК пиковая мощность накачки.

На первых этапах внедрения оптических волокон [35] континуум формировался уширением отдельных спектральных линий, возникающих за счет ВКР и ЧВВ. В дальнейшем было установлено [34], что существенного повышения эффективности спектрального преобразования сверхкоротких импульсов в МС-волокнах можно достичь в режиме аномальной дисперсии. В этом режиме ключевую роль играют солитонные явления, такие как солитонный сдвиг частоты, приводящий к низкочастотному смещению центральной частоты, и солитонные неустойчивости, индуцирующие излучение новых спектральных компонент, смещенных в высокочастотную область спектра. Межмодовое фазовое согласование приводит к возникновению интенсивного сигнала вблизи частоты третьей гармоники [34], который может вносить существенный вклад в генерацию широкополосного излучения на выходе волокна.

МС-волокна по своей внутренней архитектуре принципиально отличаются от обычных оптических волокон. Их строение определяет система периодических или аperiodических отверстий микронного масштаба, ориентированных вдоль оси световода. Форма отверстий чаще круглая или эллиптическая. Заполнение микрокапилляров, оптические качества материала волокна играют определяющую роль в формировании энергетических и спектральных характеристик проходящего излучения. Эти вопросы являются предметом самостоятельных научных исследований [38, 39].

Наряду с известным режимом полного внутреннего отражения, МС-волокна поддерживают волноводные моды электромагнитного излучения, возникающие за счет когерентного рассеяния излучения на микронеоднородностях показателя преломления и, в определенных условиях, за счет высокой отражательной способности оболочки волокна в области фотонных запрещенных зон. Такие условия реализуются, например, в волокнах с оболочкой в виде двумерной периодической структуры

(двумерный фотонный кристалл) и полой сердцевиной (*hole fibers* [40]).

Возможность управления дисперсией волноводных мод путем многообразной трансформации микроструктуры оптического волокна, вариации химического состава материалов ядра и обкладки волновода и, наконец, путем изменения геометрического сечения волновода (*tapered fibers* [43]) позволяет радикально увеличить эффективность нелинейно-оптических взаимодействий и расширить область практических применений новых лазерных источников и усилителей. МС-волокна с анизотропной, например эллиптической, формой полых капилляров дают возможность аппаратурного управления состоянием поляризации широкополосного излучения за счет того, что ортогонально поляризованные моды в таких волокнах имеют разные дисперсии групповых скоростей и разные модовые индексы [40, 41].

К настоящему времени разработаны и успешно используются несколько типов МС-волокон, позволяющих решить широкий круг задач лазерной физики, нелинейной спектроскопии, лазерной биомедицины [34, 42–44]. Для задач лазерного зондирования природных объектов несомненный интерес представляют волокна с двойной МС-оболочкой [45, 46]. В подобных волокнах внутренняя часть оболочки служит для доставки обратно рассеянного сигнала к приемнику излучения, а возбуждающее излучение направляется на объект по центральной части волокна.

Первые испытания таких оптических сенсоров [45] показали их высокую эффективность для зондирования взвеси биологического вещества в растворе на основе регистрации спектров лазерно-индуцированной флуоресценции. В работе [14] иллюстрируется возможность использования видимого участка СК для дистанционной оценки микрофизических параметров тропосферного аэрозоля. Переход в ближний и средний ИК-диапазоны позволяет значительно увеличить информационные возможности лазерного зондирования, благодаря включению в сферу контроля широкого класса атмосферных гидрометеоров (облака, туманы, туманные дымки, морось и др.) и малых газовых примесей, влияющих на тепловой режим планеты.

Продолжая исследования [14], в данной статье мы обсудим некоторые методологические особенности многочастотного зондирования облачного аэрозоля на базе широкополосных волоконных лазеров.

3. Применение широкополосного излучения суперконтинуума в задачах лидарного зондирования атмосферных параметров

3.1. Фемтосекундный лидар белого света «Teramobile»

Техника лидарного зондирования получила широкое распространение в системах оперативного мониторинга окружающей среды, включая станции

орбитального контроля [10, 15, 16, 31–33, 47, 48]. Современный уровень приемопередающей аппаратуры и алгоритмического обеспечения позволяет получать 3D-профили концентрации атмосферного аэрозоля, водяного пара, температуры и некоторых парниковых газов. В частности, лидары дифференциального поглощения (DIAL) используются в рутинном режиме [49–55] для измерения пространственного распределения озона, SO₂ и NO₂ с чувствительностью не хуже нескольких ppb на дальностях до 10 км. Возможности аэрозольных лидаров отражаются в результатах долгосрочного контроля состояния стратосферы и полярных облаков [10, 49, 56–58], оказывающих определяющее влияние на радиационный режим планеты. Однако информационное содержание отмеченных результатов не может удовлетворять возрастающим требованиям контроля техногенных и природных выбросов опасных аэрозольных и газовых продуктов в тропосферу, их влияния на озоновый слой и растительный покров.

Расширение DIAL-методики в УФ- и ближний ИК-диапазоны, где расположены полосы молекулярного поглощения многих парниковых газов и полиароматических углеводородов, ограничено эффектами взаимной интерференции указанных соединений [59, 60]. Существующие аэрозольные лидары не позволяют получать оперативные данные о структуре и химическом составе частиц в реальной окружающей среде, хотя именно такая информация может отражать появление патогенных примесей (бактерии, вирусы, опасные химические соединения). На данном этапе решение этой проблемы достигается обычно путем привлечения дополнительных средств контактного экспресс-анализа [61].

В 1998 г. специалистами франко-германского научного коллектива [8, 62] проведен исторический натуральный эксперимент, в котором излучение мощного фемтосекундного лазера на Ti:Sa было направлено в атмосферу. На расстоянии нескольких десятков метров возник протяженный плазменный канал белого света, излучение которого было зарегистрировано с высоты более 12 км. Уже первые предварительные опыты показали, что предложенный когерентный источник широкополосного излучения открывает принципиально новые возможности исследования атмосферы. Созданный в короткий срок мобильный вариант фемтосекундного лидара белого света «Teramobile» [9] позволил получить ряд уникальных результатов в плане комплексного зондирования аэрозольного и газового состава атмосферы.

В частности, в работах [8, 9] представлены пространственно-разрешенные дифференциальные спектры пропускания для наиболее характерных полос H₂O (725 и 830 нм) и O₂ (687 и 761 нм). Спектры сняты с помощью скоростного многоканального анализатора (Scientific Instrument) с разным высотным разрешением в интервале 0,15–1,1 км. В [63] высотный потолок зондирования поднят до 4,5 км, а использование интенсифицированного образца ПЗС-матрицы (ICCD) позволило регист-

рировать спектры пропускания в более широком диапазоне 680–920 нм. Эти результаты стимулировали интерес к применению ультракоротких лазерных импульсов в атмосферных исследованиях в других странах [68–72]. В частности, японские специалисты [69–71, 73] существенно модифицировали технику генерации суперконтинуума, используя газовую ячейку длиной 9 м, заполненную инертным газом, что дало возможность получить практически плоский суперконтинуум со спектральной плотностью 1 ГВт/нм в интервале 300–950 нм с контролируемыми поляризационными характеристиками. Исключив процессы филаментации из свободной атмосферы, они смогли эффективно использовать традиционную аналитическую технику многочастотного лазерного зондирования [10, 15, 16] для восстановления микрофизических параметров тропосферного аэрозоля.

Результаты уникального эксперимента с использованием суперлазера ALISE, созданного в научном центре при Комиссариате по атомной энергии (CEA-CESTA, Франция) приведены в работе [64]. Излучение лазера ($\lambda = 1053$ нм, $\Delta\lambda = 3$ нм, длительность импульса – 570 фс, энергия импульса – 23 Дж) направлялось вертикально вверх, образуя суперконтинуум протяженностью до 350 м. Сигнал обратного рассеяния в спектральном участке $\Delta\lambda = 300$ –470 нм был зарегистрирован с высот более 25 км, несмотря на легкую облачность и скромные размеры приемного телескопа (диаметр – 20 см). Это говорит о высокой спектральной интенсивности лазера белого света и его потенциальных возможностях для зондирования средней атмосферы, включая облачность верхнего яруса.

Для более детального и корректного зондирования микрофизических характеристик облачных капель и кристаллов, средние размеры которых составляют несколько микронов, требуется, согласно дифракционной теории Лоренца–Ми [10, 16], излучение ближнего ИК-диапазона. Попытка использования для этих целей инфракрасного крыла суперконтинуума лидарного комплекса «Teramobile» [65] не привела к успеху. Несмотря на то что суперконтинуум, генерируемый в воздухе излучением Ti:Sa-лазера, распространяется в ИК-область до 4,5 мкм [7], его спектральная интенсивность стремительно падает. Использование широкополосных фильтров с разрешением $\Delta\lambda \approx 500$ нм, как это было сделано авторами [65], не может решить проблему, поскольку снижается информативность сигнала обратного рассеяния относительно размера частиц [16, 66, 67].

3.2. Использование нелинейных оптических эффектов

Формирование сигналов обратного рассеяния в режиме филаментации не удовлетворяет линейному уравнению лазерной локации [74, 75], что затрудняет его решение. Тем не менее сами по себе нелинейные оптические эффекты, возникающие при взаимодействии ультракоротких тераваттных им-

пульсов с атмосферным аэрозолем, открывают новые возможности дистанционной диагностики химического состава частиц, включая актуальную проблему идентификации опасных патогенных примесей биологической природы.

Высокая пиковая мощность фемтосекундного излучения при низкой энергии импульса позволяет индуцировать в объеме микрочастицы, содержащей локализованные молекулы флуорофора, специфичные нелинейные эффекты, не связанные с тепловыми эффектами инкаандесценции, испарения или взрыва. Специфичность нелинейных процессов в аэрозольной частице проявляется в сильной локализации эмиссии лазерно-индуцируемой флуоресценции (ЛИФ) в направлении обратного рассеяния [76–79]. Авторы указанных работ считают, что обнаруженный эффект кратного усиления сигнала ЛИФ в схеме моностатического зондирования существенно повышает потенциальные возможности флуоресцентного лидара. Локализация излучения относится к одному из классов нелинейных процессов, поскольку ее интенсивность пропорциональна n -й степени интенсивности падающего излучения $I^n(r)$ [$r(x, y, z)$ – положение внутри частицы; n – количество фотонов, участвующих в акте возбуждения молекулы флуорофора]. Строгое электродинамическое описание явления находится в процессе построения. Однако не вызывает сомнения, что оно связано с процессами некогерентной мультифотонной ионизации внутри частицы.

В работах [76, 80] экспериментально и теоретически показано, что в такие процессы вовлекаются от 2 до 5 фотонов. Мультифотонная лазерно-индуцируемая флуоресценция (МЛИФ) возникает как в сферических частицах, так и в частицах неправильной формы [80]. В большей степени ее интенсивность зависит от концентрации молекул флуорофора в дисперсной среде. Для активных естественных флуорофоров, таких как рибофлавин и некоторые аминокислоты (триптофан, тирозин) и НАДХ (никотинамидаденин-динуклеотид), МЛИФ проявляется уже при $n = 2, 3$.

В результате МЛИФ эмиссия флуоресценции, близкая по своей природе к изотропной, приобретает максимум в направлении обратного распространения. Сильная анизотропия МЛИФ на индивидуальных микрочастицах, содержащих триптофан, рибофлавин и другие природные и синтетические флуорофоры, была получена в работах [77, 78]. Эксперименты позволяли измерять отношение $Rf = P(180^\circ)/P(90^\circ)$, т.е. асимметрию вторичного излучения в двух угловых направлениях, при облучении одной частицы одним лазерным импульсом.

Отмечено существенное увеличение анизотропии МЛИФ за счет локализации эмиссии в обратном направлении $P(180^\circ)$; при изменении $n = 1, 2, 3$ Rf увеличивается от 1,8 до 9,0. При дальнейшем увеличении $n = 4, 5$ на водных микрочастицах наблюдался лазерно-индуцируемый пробой (ЛИП). На других материалах значение $Rf = 35$ при $n = 5$ [81]. Таким образом, сочетание техники МЛИФ

с ЛИП потенциально дает информацию о составе частиц. В работах [86, 87] экспериментально демонстрируется возможность использования управляемого суперконтинуума для дистанционной оценки содержания Na в составе жидкокапельного аэрозоля, а также цианорадикалов (CN) и органических элементов (CI) в составе твердотельных аэрозольных частиц на основе ЛИП. Суперконтинуум генерировался с использованием традиционного Ti:Sa-лазера (800 нм, 45 фс, 10 Гц).

Использование фемтосекундных импульсов, длительность которых сопоставима с временными масштабами затухания спонтанной и вынужденной флуоресценции, открывает возможность дифференцировать присутствие различных пигментов в составе атмосферного аэрозоля или в растительном покрове по качественному характеру затухания. Поскольку эффективные методы регистрации ультракоротких оптических сигналов отсутствуют, широко применяется (см., например, [82]) косвенный, так называемый *pump-probe*-метод. В этом методе используются четыре элемента: исследуемый объект, воздействующий (*pump*) лазерный импульс, зондирующий (*probe*) лазерный пучок и детектор излучения.

Под воздействием фемтосекундного зондирующего излучения в объекте происходят быстрые процессы (образование плазмы, фазовые переходы, химические реакции и т.д.). Эти процессы исследуются зондирующим импульсом. Регулируемая задержка между *pump*- и *probe*-пучками позволяет исследовать временную структуру процессов, происходящих в образце. Детальное изложение физических основ *pump-probe*-спектроскопии, включая квантово-механическое описание, содержится в монографии [83].

В работе [84] предложена новая концепция фемтосекундного *pump-probe*-метода, использующая качественные особенности процессов затухания флуоресценции в органических и биологических материалах. Эта проблема весьма актуальна в связи с необходимостью оперативного контроля патогенных выбросов в атмосферу. Фотовозбуждение молекул сопровождается рядом быстропротекающих процессов, таких как внутримолекулярное перераспределение колебательной энергии, внутренняя конверсия (переход между электронными состояниями) и диссоциация. Эти процессы происходят во временных масштабах порядка пикосекунд и короче, поэтому для детального их исследования требуется фемтосекундное разрешение.

Суть концепции состоит в том, что после возбуждения молекулы флуорофора импульсом накачки (*pump*) из некоторого начального квантового состояния $S(v_0)$ (v_0 — частота накачки) в когерентный пакет колебательных возбужденных состояний $S_1(v')$ возникает спонтанная релаксация возбужденных колебательных уровней в основное состояние $S(v_0)$. Среднее время жизни спонтанной флуоресценции для биологических флуорофоров составляет $\tau_0 = 5\div 10$ нс. В пределах временной задержки $\Delta t \ll \tau_0$ направляется импульс повторной накачки (*repump*),

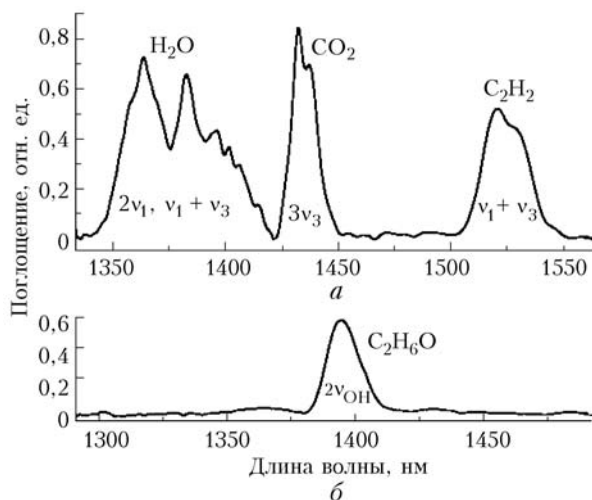
энергия которого переводит часть заселенности $S_1(v')$ на более высокие электронные состояния $S_n(v)$, откуда они также релаксируют в $S(v_0)$. Эти переходы приводят к истощению (*depletion*) заселенности промежуточного состояния $S_1(v')$.

Определяющим фактором концепции является то обстоятельство, что динамика истощения для пигментов разного молекулярного состава весьма специфична, что объясняется многообразием биохимических и физических механизмов, участвующих в процессах рекомбинации [85]. Важно, что наибольшие отличия имеют место для флуорофоров органической и биологической природы.

3.3. Перспективы применения оптоволоконной техники

Оптоволоконная техника, включая источники и преобразователи световых импульсов, находит широкое применение в области дистанционного оптического зондирования окружающей среды. Основные преимущества волоконных лазерных систем и нелинейных оптических устройств обусловлены прежде всего их компактностью, надежностью и относительно невысокой стоимостью. Световодная геометрия генерации, усиления и нелинейно-оптического преобразования лазерного излучения обеспечивает высокую эффективность преобразования энергии накачки и отвода тепла. При этом сохраняются возможности простого управления пространственно-временными параметрами лазерного излучения. Несмотря на ограниченные энергетические данные первых образцов оптоволоконных лазеров и усилителей, они сразу нашли применение в технике когерентного лидарного зондирования профилей скорости ветра [32, 88] и концентрации водяного пара [89].

Современные оптические волноводы, активированные комплексом ионов редкоземельных элементов, например $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ [23, 95], позволяют существенно расширить информационное содержание лидарных измерений. Использование достаточно широкой полосы излучения таких лазеров в области 1,1–1,6 мкм дает возможность синхронной регистрации сигнала обратного рассеяния на конечном наборе информативных длин волн, повышая, например, помехоустойчивость метода дифференциального поглощения [30]. Как отмечалось выше (п. 1), еще большие возможности открывают новые источники излучения с широким непрерывным спектром, разработанные на основе МС-световодов с высокой оптической нелинейностью [37–40, 90, 96, 97, 99]. В лабораторных спектроскопических исследованиях [95, 99] подобные источники начинают успешно вытеснять традиционные лазеры на красителях и полупроводниковые лазеры, требующие громоздкой оптико-механической настройки. В качестве характерного примера на рисунке приведен, по данным [99], спектр поглощения газовой смеси (H_2O , CO_2 , C_2H_2 и $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) в кювете при давлении $P = 10$ бар и температуре $T = 330$ К.



Спектры поглощения газовой смеси: *a* – CO₂ (99%), H₂O (0,5%) и C₂H₂ (0,5%); *б* – N₂ (99 %) и C₂H₆O (1%) в кювете длиной 184 см под давлением $P = 10$ бар и при температуре $T = 330$ К, по данным [99]

Спектр в интервале $\Delta\lambda = 1350\div 1550$ нм снимается за полное время (25 мкс) путем осреднения 1000 вспышек суперконтинуума длительностью 300 фс и пиковой мощностью 5 кВт. Суперконтинуум генерируется в высоконелинейном МС-световоде (IMRA – *continuum option*) длиной 100 м.

Известны первые успешные попытки использования излучения суперконтинуума оптоволоконных источников для дистанционного газоподготовки [91, 93, 94], когерентного доплеровского зондирования [100] и для измерения обратного рассеяния от топографических поверхностей и атмосферного аэрозоля [92, 98]. В частности, в [92] использовался коммерческий источник *Koheras SuperK* (см. [97]), в котором генерация суперконтинуума с полосой $\Delta\lambda = 600\div 2000$ нм осуществлялась в микроструктурированном волокне с накачкой от 1064 нм импульсного Nd:YAG-лазера. Применив для накачки микролазер *JDSU NP-10620–100*, авторы [94] предложили конструкцию суперкомпактного лидара со спектральной полосой генерации более 1000 нм в ближнем ИК-диапазоне, охватывающем линии поглощения большинства парниковых газов. На дистанциях небольшой дальности (до 300 м) лидар доказал свою состоятельность для мониторинга концентрации водяного пара.

Заключение

Выполнен предварительный анализ существующих и перспективных источников широкополосного когерентного излучения с позиций их значимости в проблеме дистанционного лазерного зондирования окружающей среды и в первую очередь земной атмосферы. Первые требования к подобным источникам, вытекающие из постановки задачи, – дальность действия и возможность съема информации с высоким пространственным и управляемым спектральным разрешением. Другими словами, лазерные сигналы должны иметь высокую пиковую

мощность, близкую к дифракционной направленности, малую длительность зондирующего импульса (менее 5–10 нс), невысокую (в масштабах килогерц) частоту повторения импульсов, близкую к плоской спектральной конфигурации излучаемого или перестраиваемого континуума, достаточную (не менее октавы) спектральную ширину континуума, чтобы покрыть наиболее информативные полосы пропускания земной атмосферы.

Второе, кардинальное, требование вытекает из технологии производства и эксплуатации лазерного источника в широком смысле слова (лазер накачки, осциллятор, усилитель, параметрический преобразователь и пр.). В первую очередь, это массогабаритные параметры, энергоёмкость, стабильность в условиях экстремальных температур, радиационной и электромагнитного фона и т.д. В требованиях NASA [101, 102] к конструкции орбитальных лидаров следующего поколения изложено около 20 пунктов, регламентирующих технологические критерии комплектации и эксплуатации перспективных лидарных систем. В соответствии с этими критериями в документах [101, 102] предпочтение отдается лидарным системам, полностью или почти полностью состоящим из оптоволоконных элементов. Этот вывод совпадает с результатами настоящего качественного анализа.

Несмотря на то что на данном отрезке времени энергетические показатели коммерческих образцов оптоволоконных излучателей заметно отстают от подобных показателей лучших образцов твердотельных лазеров (Nd:YAG, Ti:Sa и др.), технология производства оптоволоконных лазеров и усилителей развивается стремительно. За последние 4–5 лет достигнута мощность непрерывного излучения до 2 кВт [103] и пиковая мощность на уровне мегаватт в импульсном мультикилогерцевом режиме [104].

Сохраняются проблемы генерации импульсов в режиме модуляции добротности и стабилизации спектральной формы суперконтинуума при высокой мощности излучения. Не вызывает сомнений, что в ближайшее время эти проблемы будут решены и актуальной станет задача алгоритмического обеспечения систем обработки данных лазерного зондирования на основе нового поколения широкополосных когерентных источников оптического излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-01-00509, 09-01-00698, 09-07-00477, 09-05-00738).

1. Luther G.G., Newel A.C., Moloney J.V. Wright E.M. Short-pulse conical emission and spectral broadening in normally dispersive media // *Opt. Lett.* 1994. V. 19. P. 789–791.
2. Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air // *Opt. Lett.* 1995. V. 20. P. 73–75.
3. Le Blanc C., Curley P., Salin F. Gain-narrowing and gain-shifting of ultra-short pulses in Ti:Sapphire amplifiers // *Opt. Commun.* 1996. V. 131. P. 391–398.
4. Nibbering E.T.J., Curley P.F., Grillon G., Prade B.S., Franco M.A., Salin F., Mysyrowicz A. Conical emis-

- sion from self-guided femtosecond pulses in air // Opt. Lett. 1996. V. 21. P. 62–64.
5. Brodeur A., Chien C.Y., Ilkov F.A., Chin S.L., Kosareva O.G., Kandidov V.P. Moving focus in the propagation of ultrashort laser pulses in air // Opt. Lett. 1997. V. 22. P. 304–306.
 6. Backus S., Durfee C.G., Murnan M.M., Kapteyn H.C. High power ultrafast lasers // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. P. 1207–1223.
 7. Kasparian J., Mondelain R.S.D., Niedermeier S., Yu J., Wolf G.P., Andre Y.B., Franco M., Prade B., Tzortzakis S., Mysyrowicz A., Rodrigues M., Wille H., Wöste L., Infrared Extension of the supercontinuum generated by femtosecond terawatt laser pulses propagation in the atmosphere // Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 1397–1399.
 8. Rairoux P., Schillinger H., Niedermeier S. Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses. // Appl. Phys. B. 2000. V. 71. P. 573–580.
 9. Wille H., Rodrigues M., Kasparian J. Teramobile: a mobile femtosecond-terawatt laser and detection system // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2002. V. 20. P. 183–190.
 10. Иванов В.И., Малевич И.А., Чайковский А.П. Многофункциональные лазерные системы. Минск: Изд-во «Университетское», 1986. 287 с.
 11. Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квант. электрон. 2001. Т. 31. С. 95–108.
 12. Ross I.N., Collier J., Matousek P., Danson C., Neely D., Allott R., Pepler D., Hernandez-Gomez C., Osvay K. Generation of terawatt pulses by use of optical parametric chirped pulse amplification // Appl. Opt. 2000. V. 39. N 15. P. 2422–2427.
 13. Бабин А.А., Киселев А.М., Сергеев А.М., Стенанов А.Н. Терраваттный фемтосекундный Ti:Sa лазерный комплекс // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 7. С. 623–626.
 14. Bourayou R., Mejean G., Kasparian J., Rodrigues M., Salmon E., Yu J., Lehrmann H. White-light filaments for multiparameter analysis of cloud microphysics // J. Opt. Soc. Amer. B. 2005. V. 22. P. 369–377.
 15. Матвиенко Г.Г., Веретенников В.В., Креков Г.М., Крекова М.М. Дистанционное зондирование атмосферных аэрозолей с использованием фемтосекундного лидара белого света // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 12. С. 1107–1115.
 16. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования. Новосибирск: Наука, 1982. 242 с.
 17. Bonvalet A., Joffre M., Martin J.L., Migus A. Generation of ultra broadband femtosecond pulses in the mid-infrared by optical rectification of 15 fs light pulses at 100 MHz repetition rate // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 2907–2909.
 18. Reed M.K., Steiner M.K. Tunable infrared generation using a femtosecond 250 kHz Ti:Sapphire regenerative amplifier // J. Quantum Electron. 1996. V. 32. P. 1273–1277.
 19. Amoroso S., Amodeo A., Arntnante M., Boselli A., Mona L., Pandolfi M. Development of tunable IR lidar system // Opt. and Lasers Eng. 2002. V. 37. P. 521–532.
 20. Иванов А.А., Алфимов М.В., Желтиков А.М. Фемтосекундные импульсы в нанофотонике // Успехи физ. наук. 2004. Т. 174. С. 743–763.
 21. Kobayashi T., Shirakava A. Tunable visible and near-infrared pulse generator in a 5 fs regime // Appl. Phys. B. 2000. V. 70 [Suppl.]. P. S239–S246.
 22. Таусенов А.В., Крюков П.Г., Бубнов М.М., Лихачев М.Е., Романова Е.Ю., Яшков М.В. Эффективный источник фемтосекундных импульсов и его использование для генерации широкополосного суперконтинуума // Квант. электрон. 2005. Т. 35. С. 581–585.
 23. Tacheo S., Sorbello G., Longhi S., Laporta P. Measurement of the energy transfer and up-conversion constants in Er³⁺/Yb³⁺-doped phosphate glass // Opt. and Quant. Electron. 1999. V. 31. P. 249–262.
 24. Fragemann A., Pasiskoviccius V., Laurell F. Broadband nondegenerate optical parametric amplification in mid infrared with periodically poled KTiOPO₄ // Opt. Lett. 2005. V. 30. P. 2296–2298.
 25. Petrov V., Noack F., Tzankov P., Ghotbi M. High-power femtosecond optical parametric amplification at 1 kHz in BiB₃O₆ pumped at 800 nm // Opt. Express. 2007. V. 15. P. 556–565.
 26. Veasey D.L., Funk D.S., Peters P.M., Sandford N.A. Yb/Er-codoped and Yb-doped waveguide lasers in phosphate glass // J. Non-Cryst. Solids. 2000. V. 263. P. 369–381.
 27. Yu F.T., Yin S. Fiber Optics Sensors. New York: Marcel Dekker Inc., 2002. 262 p.
 28. http://www.rp-photonics.com/rare_earth_doped_gain_media.html
 29. http://www.topica.com/product/itemlayer/97/Photonics_West%202007.pdf
 30. Nilsson J., Sahu J., Jeong Y., Clarkson A., Selvas R. High power fiber lasers // Proc. SPIE. 2003. V. 4974. P. 50–59.
 31. Sharma U., Kim C.S., Kang J.U. Highly stable tunable-wavelength Q-switched fiber laser for DIAL application // IEEE Photonics Technol. Lett. 2004. V. 16. P. 1277–1280.
 32. McGrath A.J., Munch J., Smith G., Veitch P. Injection-seeded, single-frequency, Q-switched erbium:glass laser for remote sensing // Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 5706–5709.
 33. Pearson G.N., Roberts P.J., Eacock J.R., Harris M. Analysis of the performance of a coherent pulsed fiber lidar for aerosol backscatter application // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 6442–6450.
 34. Желтиков А.М. Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики. М.: Наука, 2006. 261 с.
 35. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. San Diego: Academic Press, 2001. 261 p.
 36. Кашкаров П.К., Головань Л.А., Заботнов С.В., Мельников В.А., Круткова Е.Ю., Желтиков А.М. Увеличение эффективности нелинейно-оптических взаимодействий в наноструктурированных полупроводниках // Физ. тверд. тела. 2005. Т. 47. С. 153–159.
 37. Smirnov S.V., Ania-Castanon J., Ellingham T.J., Kobtsev S.M., Kukarin S. Optical spectral broadening and supercontinuum generation in telecom application // Optical Fiber Technol. 2006. V. 12. P. 122–127.
 38. Steinmeyer G. A review of ultrafast optics and optoelectronics // J. Opt. A. 2003. V. 5. P. R1–R15.
 39. Ranka J.K., Windler R.S., Stentz A.J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fiber with anomalous dispersion at 800 nm // Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 25–27.
 40. Желтиков А.М. Оптика микроструктурированных волокон. М.: Наука, 2004. 274 с.
 41. Bjarklev A., Broeng J., Bjarklev A.S. Photonic Crystal Fibre. Boston: Kluwer Academic Publ., 2003. 343 p.
 42. Steel M.J., Osgood R.M. Elliptical-hole photonics crystal fibers // Opt. Lett. 2001. V. 26. P. 229–231.
 43. Nikogosyan D.N. Nonlinear Optical Crystal: Complete Survey. N.Y.: Springer Publ., 2005. 414 p.

44. *Nicholson J.W., Yablon A.D., Westbrook P.S., Feder K.S., Yan M.F.* High power single mode, all-fiber source of femtosecond pulses at 1550 nm and its use in supercontinuum generation // *Opt. Express*. 2004. V. 12. P. 3025–3034.
45. *Konorov S.O., Zheltikov A.M., Scalora M.* Photonic-crystal fiber as multifunctional optical sensor and sample collector // *Opt. Express*. 2005. V. 13. P. 3454–3459.
46. *High Peak Power Fiber Lasers for Lidar/Ladar Applications* // <http://www.ewh.ieee.org/r2/baltimore/leos/BaltimoreLEOSMeeting20>
47. *Liu Z., Voelger P., Sugimoto N.* Simulation of the observation of clouds and aerosols with the Experimental Lidar in Space Equipment system // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. P. 3120–3137.
48. *Winker D.M., Couch R.H., McCormick M.P.* An overview of LITE: NASA's Lidar In-space Technology Experiment // *Proc. IEEE*. 1996. V. 84. P. 164–179.
49. *Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д.* Лазерное зондирование средней атмосферы. Томск: РАСКО, 2002. 352 с.
50. *Godin S., Carswell A.I., Donovan D.P., Claude H., Steibrecht W.* Ozone differential absorption lidar algorithm intercomparison // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. N 30. P. 6225–6236.
51. *Fiorani L., Durieux E.* Comparison among error calculations in differential absorption lidar measurements // *Opt. and Laser Technol.* 2001. V. 33. P. 371–377.
52. *Kölsch H. J., Rairoux P., Wolf J.-P., Wöste L.* Comparative study of nitric-oxyde immission in the cities of Lyon, Geneva and Stuttgart using a mobile differential absorption Lidar system // *Appl. Phys. B*. 1992. V. 54. P. 89–94
53. *Kölsch H. J., Rairoux P., Wolf J.-P., Wöste L.* Simultaneous NO and NO₂ measurement using BBO crystals // *Appl. Opt.* 1989. V. 28. P. 2052–2056.
54. *Wolf J.-P.* UV-DIAL-Lidar Techniques for Air Pollution Monitoring // *Encyclopedia of Analytical Chemistry* / Ed. R.A. Meyers. N.Y.: J. Wiley & Sons, 2000. V. 3. P. 2226–2247.
55. *Duclaux O., Frejafon E., Schmidt H., Thomasson A., Mondelain D.* 3D-air quality model evaluation using the Lidar technique // *Atmos. Environ.* 2002. V. 36. P. 5081–5095.
56. *Ельников А.В., Креков Г.М., Маричев В.Н.* Лидарные наблюдения стратосферного слоя аэрозоля над Западной Сибирью // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана*. 1988. Т. 24. С. 818–823.
57. *Stebel K., Neuber R., Beyerle G.* Lidar observations of polar stratospheric clouds above Spitsbergen // *Advances in Atmos. Remote Sensing*. Berlin: Springer, 1997. P. 509–512.
58. *Guasta M., Morandi M., Stefanutti B., Stein L., Wolf J.-P.* Derivation of mount Pinatubo stratospheric aerosol mean size distribution by means of a multiwavelength Lidar // *Appl. Opt.* 1994. V. 33. P. 5690–5697.
59. *Beniston M., Wolf J.-P., Beniston-Rebetez M., Kölsch J., Rairoux P., Wöste L.* Use of Lidar Measurements and numerical models in air-pollution research // *J. Geophys. Res. D*. 1990. V. 95. N 7. P. 9879–9894.
60. *Walmsley H.L., O'Connor S.J.* The accuracy and sensitivity of infrared differential absorption lidar measurements of hydrocarbon emissions from process units // *Pure and Appl. Opt.* 1998. V. 7. P. 907–925.
61. *Kasparian J., Fréjafon E., Rambaldi P., Yu J., Ritter P., Viscardi P., Wolf J.-P.* Characterization of urban aerosols using SEM-microscopy, X-Ray analysis, and Lidar measurements // *Atmos. Environ.* 1998. V. 32. P. 2957–2967.
62. *Wöste L., Wedekind C., Wille H., Rairoux P., Stein B., Werner C., Niedermeier S., Ronneberger F., Schillinger H., Sauerbrey R.* Femtosecond atmospheric lamp // *Laser und Optoelektronik*. 1997. E. 2688. P. 445–461.
63. *Kasparian J., Rodrigues M., Mejean G., Salmon J.Yu., Wille H., Wolf J.-P., Franco M., Mysyrowicz A., Wöste L.* White-light filaments for atmospheric analysis // *Science*. 2003. V. 301. P. 61–64.
64. *Bejot P., Bonasina L., Extermann J., Moret M., Wolf J.-P., Ackermann R.* 32 TW atmospheric white-light laser // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. P. 151106.
65. *Mejean G., Kasparian J., Salmon E., Yu J., Wolf J.-P., Bourayou R.* Towards a supercontinuum-based infrared lidar // *Appl. Phys. B*. 2003. N 77. P. 357–359.
66. *Thomalla E., Quenzel H.* Information content of aerosol optical properties with respect to their size distribution // *Appl. Opt.* 1982. V. 21. P. 3170–3177.
67. *Veselovskii I., Kolgotin A., Muller D., Whiteman D.N.* Information content of multiwavelength lidar data with respect to microphysical particle properties derived from eigenvalue analysis // *Appl. Opt.* 2005. V. 44. P. 5292–5303.
68. *Chin S.L., Hosseini S.A., Liu W., Luo Q., Theberge F., Aközbek N., Becker A., Kandidov V.P., Kosareva O.G., Schroeder H.* The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: physics, applications, and new challenges // *Can. J. Phys.* 2005. V. 83. P. 863–905.
69. *Galvez M.C., Fujita M., Inoue N., Moriki R., Izawa Y., Yamanaka C.* Three-wavelength backscatter measurement of clouds and aerosols using a white light Lidar system // *Jap. J. Appl. Phys.* 2002. V. 41. P. 284–291.
70. *Somekawa T., Yamanaka C., Fujita M., Galvez M.C.* Observation of Asian Dust Aerosols with Depolarization Lidar Using a Coherent White Light Continuum // *Jap. J. Appl. Phys.* 2008. V. 47. P. 2155–2157.
71. *Somekawa T., Yamanaka C., Fujita M., Galvez M.C.* Depolarization Lidar detection and ranging using white light lidar system // *Jap. J. Appl. Phys.* 2006. V. 45. P. L165–L168.
72. *Brown D.M., Shi K., Liu Z., Philbrick C.R.* Long-path supercontinuum absorption spectroscopy for measurement of atmospheric constituents // *Opt. Express*. 2008. V. 16. P. 8457–8471.
73. *Nishioka H., Ueda K.I.* Super-broadband continuum generation with transient self-focusing of a terawatt laser pulse in rare gases // *Appl. Phys. B*. 2003. V. 77. P. 171–175.
74. *Kasparian J., Wolf J.-P.* A new transient SRS analysis method of aerosols and application to a nonlinear femtosecond Lidar // *Opt. Commun.* 1998. V. 152. P. 355–360.
75. *Faye G., Kasparian J., Sauerbrey R.* Modifications to the Lidar equation due to nonlinear propagation in air // *Appl. Phys. B*. 2001. V. 73. P. 157–163.
76. *Boutou V., Favre C., Hill S.C., Pan Y.L., Chang R.K., Wolf J.-P.* Backward enhanced emission from multiphoton processes in aerosols // *Appl. Phys. B*. 2002. V. 75. P. 145–152.
77. *Hill S.C., Boutou V., Ramstein S., Wolf J.-P., Pan Y.-L., Holler S., Chang R.K.* Enhanced back-

- warddirected multiphoton-excited fluorescence from dielectric microspheres // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. P. 54–57.
78. Pan Y., Hill S.C., Wolf J.-P., Holler S., Chang R.K., Bottiger J.R. Backward-enhanced fluorescence from clusters of microspheres and particles of tryptophan // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. P. 2994–2999.
 79. Pan Y., Holler S., Pinnick R.G., Hill S.C., Wolf J.-P., Chang R.K., Bottiger J.R. Dynamics of photon-induced degradation and fluorescence in riboflavin microparticles // *Appl. Phys. B.* 2001. V. 72. P. 449–454.
 80. Wolf J.P. Detection and identification of bacteria in air using femtosecond spectroscopy // *Analysis and Control of Ultrafast Photoinduced Reactions*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2007. P. 807–828.
 81. Favre C., Boutou V., Hill S.C., Zimmer W., Krenz M., Lambrecht H., Yu J., Chang R.K., Wöste L., Wolf J.-P. White-light nanosource with directional emission // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 89. P. 035002.
 82. Blanchard G.D. *Ultrafast Stimulated Emission Spectroscopy* // *Topics in Fluorescence Spectroscopy*. N.Y.: Plenum Press, 1997. V. 5. P. 253–293.
 83. Lindiger A., Koutecky V.B., Mitric R. Analysis and control of small isolated molecular systems // *Analysis and Control of Ultrafast Photoinduced Reaction*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2007. P. 25–134.
 84. Courvoisier F., Boutou V., Wood V., Wolf J.-P., Bartelt A., Roth M., Rabitz H. Light filaments transmitted through clouds // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. P. 063901.
 85. Courvoisier F., Boutou V., Guyon L., Wood V., Wolf J.-P., Bartelt A., Roth M., Rabitz H. Discriminating bacteria from other atmospheric particles using femtosecond molecular dynamics // *J. Photochem. and Photobiol.* 2006. V. 180. P. 300–306.
 86. Daigle J.F., Mejean G., Liu W., Theberge F., Xu H.L., Kamali Y. Long range trace detection in aqueous aerosol using remote filament-induced breakdown spectroscopy // *Appl. Phys. B.* 2007. V. 87. P. 749–754.
 87. Xu H.L., Mejean G., Liu W., Theberge F., Kamali Y., Daigle J.F. Remote detection of similar biological materials using femtosecond filament-induced breakdown spectroscopy // *Appl. Phys. B.* 2007. V. 87. P. 151–156.
 88. Karlson C.J., Olsson F.A., Letalick D., Harris M. All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μm for range, speed, vibration, and wind measurements // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. P. 3716–3726.
 89. Little L.M., Papen G.C. Fiber-based lidar for atmospheric water-vapor measurements // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. P. 3417–3427.
 90. Желтиков А.М. Микроструктурированные световоды для нового поколения волоконно-оптических источников и преобразователей световых импульсов // *Успехи физ. наук.* 2007. Т. 177. С. 737–762.
 91. Watt R.S., Kaminski C.F., Hult J. Generation of supercontinuum radiation in conventional single-mode fibre and its application to broadband absorption spectroscopy // *Appl. Phys. B.* 2008. V. 90. P. 47–53.
 92. Kaasalainen S., Lindroos T., Hyypä J. Toward hyperspectral lidar: measurement of spectral backscatter intensity with a supercontinuum laser source // *IEEE Geosci. and remote sens. lett.* 2007. V. 4. P. 211–215.
 93. Hult J., Watt R.S., Kaminski C.F. High bandwidth absorption spectroscopy with dispersed supercontinuum source // *Opt. Express.* 2007. V. 15. P. 11385–11395.
 94. Brown D.M., Shi K., Liu Z., Philbrick R. Long-path supercontinuum absorption spectroscopy for measurement of atmospheric constituents // *Opt. Express.* 2008. V. 16. P. 8457–8469.
 95. Walewski J.W., Sanders S.T. High-resolution wavelength-agile laser source based on pulsed supercontinua // *Appl. Phys. B.* 2004. V. 79. P. 415–418.
 96. Konorov S.O., Zheltikov A.M. Photonic-crystal fiber as multifunctional optical sensor and sample collector // *Opt. Express.* 2005. V. 13. P. 3454–3460.
 97. <http://optics.org/cws/product/P000000270>
 98. Holton C.E. Optical fiber ceilometer for meteorological cloud altitude sensing. Wipo Patent WO/2002/025248. <http://www.freepatentsonline.com/WO2002025248.html>
 99. Sanders S.T. Wavelength-agile fiber laser using group-velocity dispersion of pulsed super-continua and application to broadband absorption spectroscopy // *Appl. Phys. B.* 2002. V. 75. P. 799–802.
 100. Swann W.C., Newbury N.R. Frequency-resolved coherent lidar using a femtosecond fiber laser // *Opt. Lett.* 2006. V. 31. P. 826–828.
 101. *Fiber lasers and amplifiers for Earth/planetary science and exploration at NASA Goddard Space Flight Center.* <http://esto.nasa.gov/conferences/estc2006/papers/b7p1.pdf>
 102. *Fiber Laser Components Technology Readiness Overview NASA Electronic Parts and Packaging Program.* <http://misspiggy.gsfc.nasa.gov/tva/meldoc/TROfiberlasercomp.pdf>
 103. Gapontsev V., Gapontsev D., Platonov N., Shkurikhin O., Fomin V., Mashkin A., Abramov M., Ferin S. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness // *Lasers and Electro-Optics Europe. 2005. CLEO/Europe. 2005. Conf. 12–17 June 2005.* P. 508–510.
 104. Minelly J., Teodoro F., Savage-Leuchs M., Altman D. High peak power and high energy fiber amplifiers // *Lasers and Electro-Optics Society. 2006. LEOS 2006. 19th Annual Meeting of the IEEE. Oct. 2006.* P. 203–204.

G.M. Krekov, M.M. Krekova, A.Ya. Sukhanov. Estimate of the promising white-light lidar efficiency for sensing of the stratus cloud microphysical parameters.

Analytical review of existing and perspective broadband coherent light sources is presented through point of view of distant laser sounding of environment and Earth atmosphere. A swift development of technology of fiber laser and amplifiers manufacture is marked. It is suggested that fiber techniques will take a leading position in creation of lidar systems, essentially in manufacture of spaceborne lidars. The development of algorithms, methodology, and software for processing sounding data, received with lasers, based on a broadband coherent sources, became an important task.