

## ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ П.8.

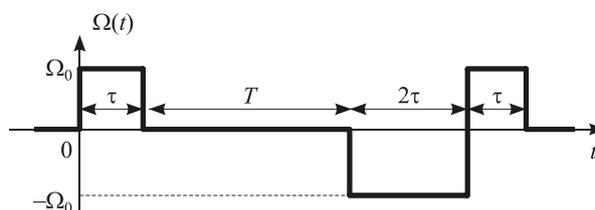
**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИКИ И ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ, В ТОМ ЧИСЛЕ ДОСТИЖЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ВО ВРЕМЕНИ, ПРОСТРАНСТВЕ И СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ, ОСВОЕНИЕ НОВЫХ ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА, СПЕКТРОСКОПИЯ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ И СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ, ПРЕЦИЗИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ И АТОМНОЙ ОПТИКИ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

**Программа П.8.1. Современные проблемы физики сверхсильных световых полей, спектроскопия сверхвысокого разрешения, лазерные стандарты частоты, прецизионные оптические измерения, проблемы квантовой и атомной оптики (координатор акад. С. Н. Багаев)**

Впервые выполнен эксперимент, подтверждающий высокую эффективность «гипер-Рамси»-спектроскопии — нового метода лазерной спектроскопии сильно запрещенных переходов ультрахолодных атомов и ионов, предложенного ранее в Институте лазерной физики (рис. 13). В совместных исследованиях ИЛФ и РТВ (Физико-техническое федеральное агентство Германии) по разработке оптического стандарта частоты на ионе иттербия экспериментально достигнуто подавление полевого сдвига частоты октупольного перехода в ионе иттербия на четыре порядка, что позволяет обеспечить погрешность частоты оптического стандарта на уровне  $10^{-17}$ — $10^{-18}$ . Этот результат был опубликован в ноябрьском номере журнала *Phys. Rev. Lett.* за 2012 год и отмечен редакцией как один из наиболее интересных в выпуске.

В Институте лазерной физики впервые в мире экспериментально продемонстрировано когерентное сложение параметрически усиленных фемтосекундных импульсов. Экспериментально реализовано неколлинеарное параметрическое усиление чирпованных фемтосекундных импульсов в кристаллах ВВО и LBO при пикосекундной лазерной накачке (рис. 14). Определены требования к основным параметрам усиленных импульсов и осуществлено их когерентное сложение. Проведенные исследования подтверждают перспективность создания лазерных систем предельно высокой, ультрарелятивистской интенсивности ( $>10^{25}$  Вт/см<sup>2</sup>) методом когерентного сложения оптических полей фемтосекундных импульсов.

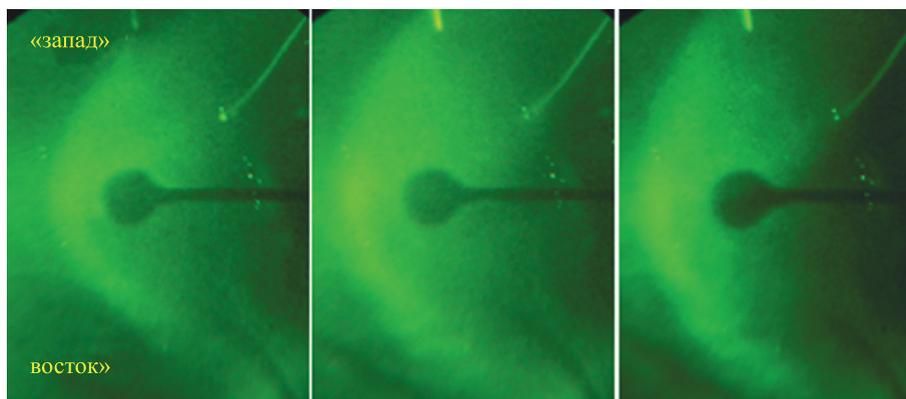
В этом же Институте в экспериментах с лазерной плазмой большой энергии  $E \sim 100$  Дж, впервые проведено комплексное моделирование эффектов сверхсжатия магнитосферы под



**Рис. 13.** Используемая в «гипер-Рамси»-спектроскопии последовательность импульсов, специально подобранных по длительности и фазе, обеспечивающая подавление полевого сдвига частоты резонансного перехода при любом значении амплитуды импульсов  $\Omega_0$ .



**Рис. 14.** Фемтосекундная лазерная система с оптическими параметрическими каскадами усиления чирпованных импульсов и пикосекундным источником излучения накачки.



**Рис. 15.** Данные съемок электронно-оптическим преобразователем модели магнитосферы (в экваториальной плоскости), формируемой лазерной плазмой для трех различных значений магнитного момента (слева—направо) соответственно,  $\mu = 2,6 \cdot 10^5$ ,  $5,2 \cdot 10^5$  и  $7,2 \cdot 10^5$  Гс·см<sup>3</sup>.

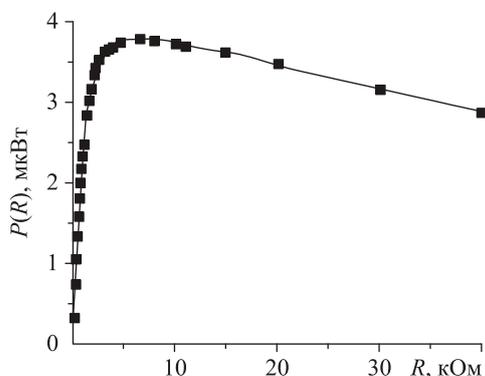
действием корональных выбросов массы (КВМ) большой энергии при наличии фоновой плазмы, имитирующей солнечный ветер и стационарную магнитосферу Земли (рис. 15). Результаты исследований позволяют более точно прогнозировать возможные глобальные последствия редких событий гигантских КВМ, способных вывести из строя различные системы в околоземном пространстве и на Земле при возможном сжатии магнитосферы до радиуса геостационарной орбиты и даже меньше.

В этом же Институте экспериментально доказан и объяснен теоретически новый эффект теплоэлектрического преобразования на полупроводящих ЖК (рис. 16). Получено преобразование энергии теплового потока в электричество с КПД и качеством, на порядок превосходящими аналогичные показатели в существующих на сегодня органических преобразо-

вателях. Теоретически показано, что КПД на основе открытого эффекта преобразования может быть сравним с предельным в цикле Карно и достигать ~30 %.

В этом же Институте впервые реализован и исследован режим активной синхронизации мод в волоконном лазере с длиной резонатора более 1 км. Разработанный цельноволокнистый эрбиевый лазер имеет нормальную дисперсию и генерирует диссипативные солитоны длительностью 8 нс с фундаментальной частотой следования 163,8 кГц и энергией 34 нДж. Реализованный метод синхронизации мод обеспечивает самозапуск и высокую стабильность режима генерации. Схема лазера и спектрально-временные характеристики излучения приведены на рис. 17. На вставках: сверху — осциллограмма регулярной последовательности генерируемых импульсов; внизу — оптический спектр излучения.

В Институте автоматике и электрометрии успешно проведены эксперименты по «прошивке» отверстий в листовых материалах: нержавеющей стали, меди, бериллиевой бронзе (толщиной 0,1—1 мм), с помощью разработанного в этом Институте одномодового диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности резонатора и удвоением частоты. Средняя мощность лазера на длине волны 532 нм составляла 5—7 Вт при частоте повторения 3—4 кГц. Фокусировка излучения на поверхности обрабатываемого материала осуществлялась с помощью внешней линзы. Диаметры отверстий варьировались от 50 мкм до 1 мм. Отверстия изготавливались путем удаления материала по периметру отверстия. Тол-



**Рис. 16.** Зависимость электрической мощности от сопротивления нагрузки теплоэлектрического преобразователя на полупроводящих ЖК при перепаде температур  $\sim 1^\circ$ .

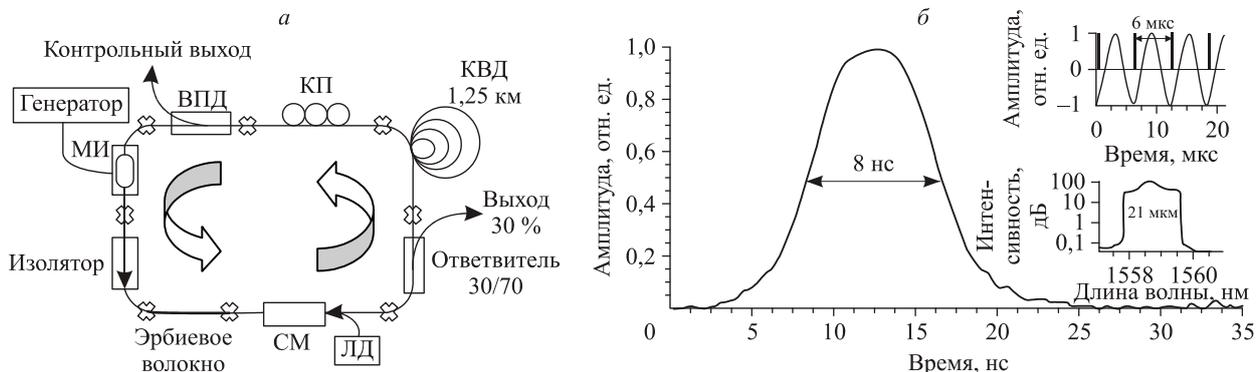


Рис. 17. Схема (а) и спектрально-временные характеристики (б) цельноволоконного эрбиевого лазера.

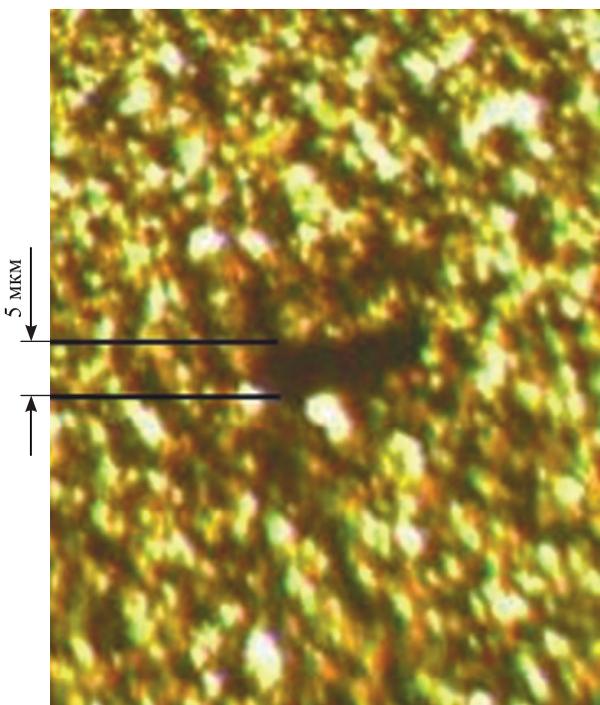


Рис. 18. Отверстие в пластине поликристаллического алмаза.

щина реза — около 10 мкм. Кроме того, получены отверстия диаметром до 5 мкм (рис. 18) в поликристаллических алмазных подложках толщиной 0,1—0,3 мм. Область приложения — новые прецизионные лазерные технологии обработки материалов.

В Институте оптики и атмосферы им. В. Е. Зуева разработана спектральная система измерений газовых атмосферных компонент на основе фурье-спектрометра Bruker IFS125M



Рис. 19. Трэкер спектральной системы измерений газовых атмосферных компонент.

(рис. 19). Она включает специально разработанный оптический трэкер, автоматически следящий за Солнцем. Солнечное излучение фокусируется на торец световода и постоянно направляется с помощью оптического волокна на входную щель спектрометра. На этой спектральной системе проведены исследования содержания атмосферных газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в г. Томск.

**Программа П.8.2. Фундаментальные проблемы взаимодействия излучения с веществом (координатор акад. А. М. Шалагин)**

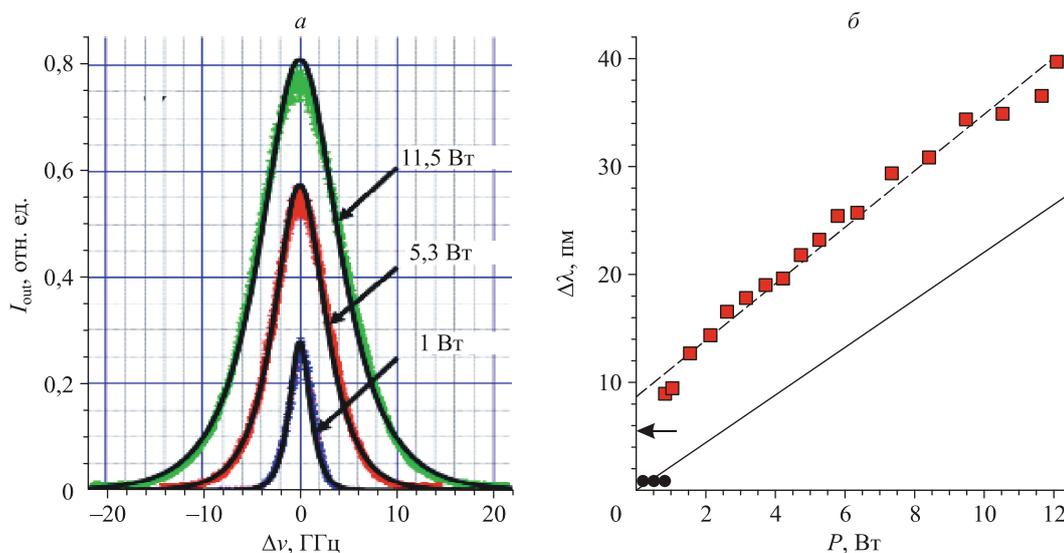
В Институте автоматики и электрометрии впервые в мире построена адекватная модель уширения спектра генерации непрерывных иттербиевых волоконных лазеров. В соответствии с моделью форма спектра излучения, состоящего из набора мод с гауссовой статистикой, определяется эффектом фазовой само-модуляции и описывается функцией гиперболического секанса (рис. 20, *а*). При этом ширина спектра генерации линейно растет с увеличением мощности лазера (рис. 20, *б*). Модель позволяет рассчитать выходные характеристики иттербиевого лазера по параметрам его резонатора.

В этом же Институте впервые теоретически и экспериментально исследовано продольное распределение генерируемой мощности в волоконном лазере со случайной распределенной обратной связью на рэлеевском рассеянии, что важно для понимания принципов работы лазера нового типа (рис. 21). Получено аналитическое выражение, которое хорошо согласуется с экспериментом.

В результате совместных исследований Института автоматики и электрометрии СО

РАН и Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (г. Снежинск) разработан и реализован новый эффективный метод внутрирезонаторной пассивной коррекции искажений волнового фронта лазерного излучения мощных твердотельных лазеров, вызванных aberrациями широкоапертурных активных элементов. Метод основан на использовании конформального оптического элемента для коррекции aberrаций. Разработана экономически эффективная технология изготовления таких элементов с диапазоном коррекции до 5 длин волн при высокой лучевой прочности. Испытание разработанных и изготовленных конформальных корректоров в лазерной системе на основе кристалла YAG : Nd<sup>3+</sup> диаметром 20 мм и длиной 100 мм продемонстрировало увеличение энергетической яркости излучения с  $2,5 \times 10^8$  до  $4,2 \times 10^{10}$  Вт/ср (рис. 22).

В Институте автоматики и электрометрии предложена и реализована новая схема волоконного резонатора, в которой процессы синхронизации мод и формирования частотно-мо-



**Рис. 20.** Выходной спектр генерации — эксперимент (точки) и теория (линии) при разной мощности (*а*); ширина спектра на полувысоте в зависимости от мощности лазера: эксперимент (точки) и его аппроксимация (штрихи), теория (линия), стрелка — оценка добавки из-за эффекта выжигания пространственных дыр (*б*).

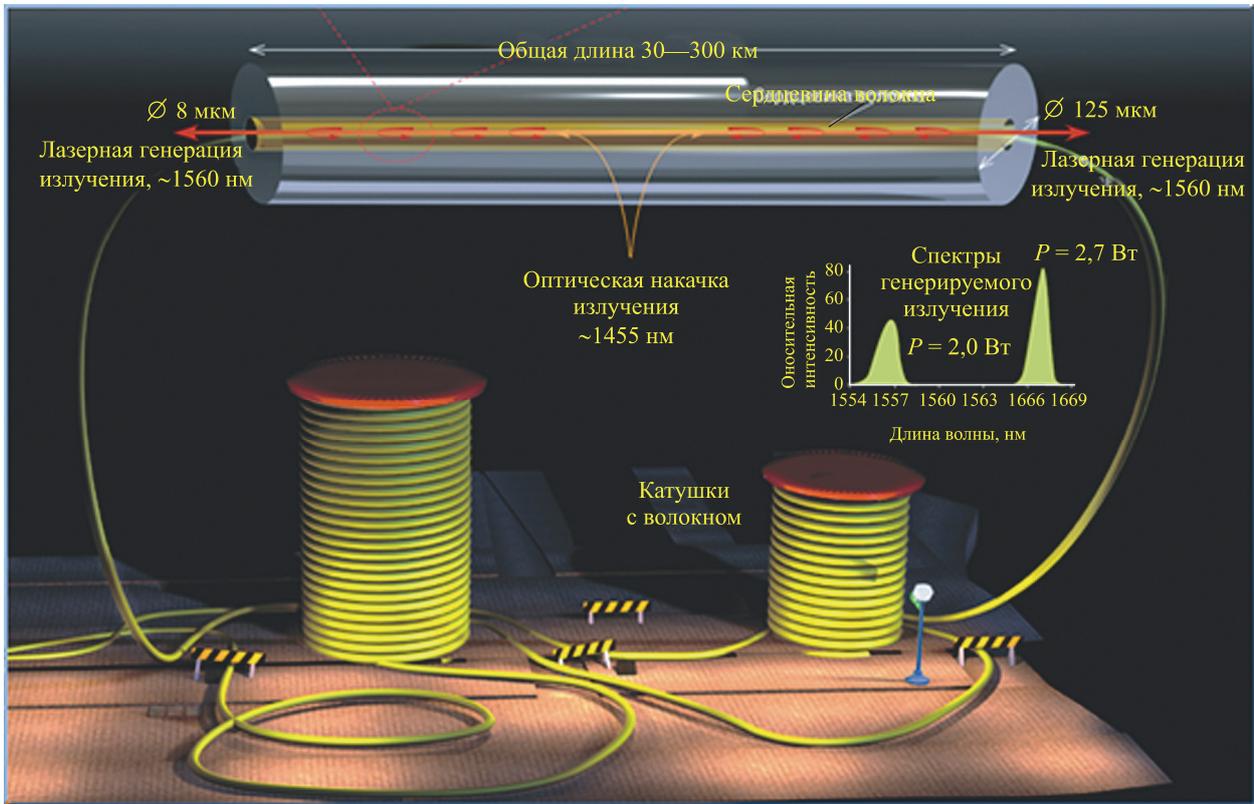


Рис. 21. Схема волоконного лазера со случайной распределенной обратной связью — лазера нового типа.

дулированных («чирпованных») импульсов разделены и осуществляются в коротком ОМ-волокне и длинном волокне с сохранением поляризации (СП) соответственно. Это позволило получить стабильную генерацию чирпованных диссипативных солитонов (ДС) в полностью волоконном резонаторе длиной до 120 м (рис. 23). При этом импульс имеет форму, близкую к прямоугольной, и сжимается внешним компрессором в  $\sim 200$  раз (до  $\sim 200$  фс). Макси-

мальная энергия ДС ограничена эффектом ВКР и для волоконного СП-световода с сердцевинной  $5,5$  мкм равна  $\sim 25$  нДж, что почти на порядок больше, чем в других вариантах полностью волоконных схем.

В Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова впервые исследована поляризация стимулированного фотонного эхо (СФЭ) на переходе  $0-1$ , сформированного тремя импульсами резонансного излучения с линейны-

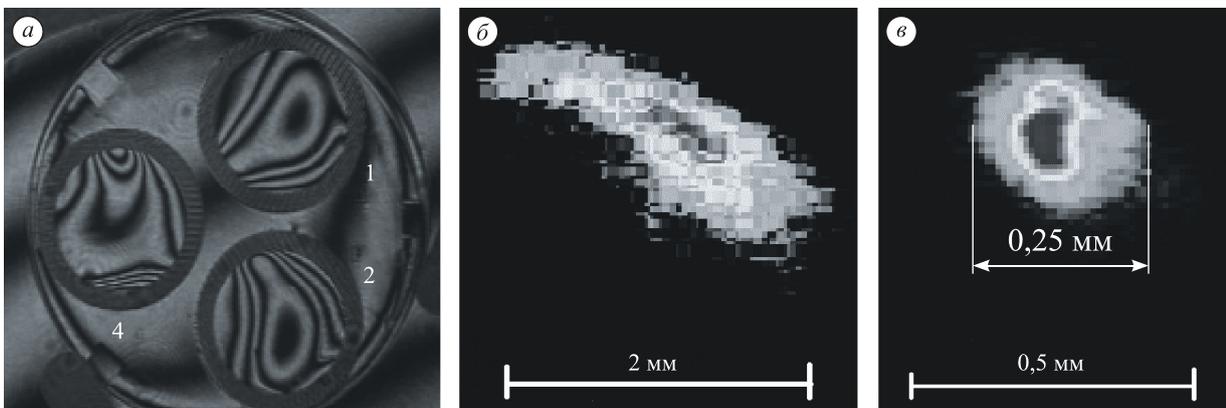
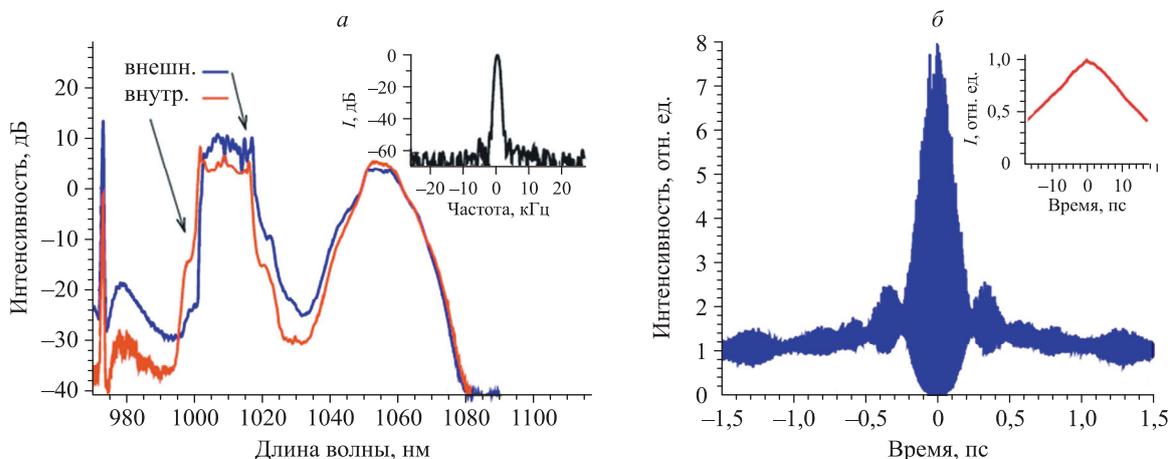


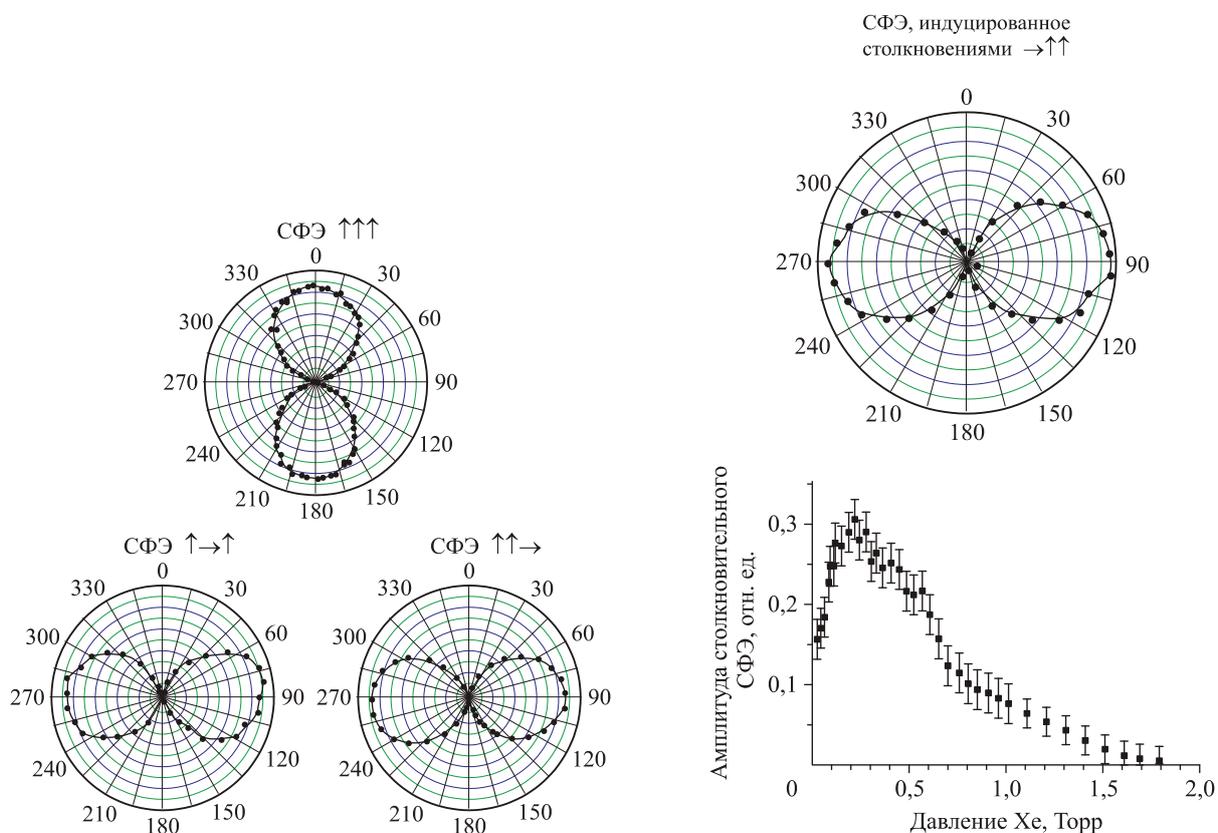
Рис. 22. Интерферограммы трех корректоров (1, 2, 4) волнового фронта (а); фотографии фокальных пятен ( $f = 300$  мм) (б — без корректора в резонаторе, в — с корректором в резонаторе).



**Рис. 23.** Характерный оптический спектр лазера внутри («внутр.») и вне резонатора («внешн.»): пик 1010 нм — солитон, пик 1055 нм — ВКР, на вставке — радиочастотный спектр (а) и интерференционная АКФ сжатого импульса, на вставке — АКФ по интенсивности несжатого импульса (б).

ми поляризациями. Экспериментальные результаты получены для СФЭ на переходе  $(6s^2) {}^1S_0 \leftrightarrow (6s6p) {}^3P_1$   ${}^{174}\text{Yb}$ . В случае, когда один

из импульсов имеет линейную поляризацию, скрещенную с поляризациями двух других возбуждающих импульсов, СФЭ поляризовано



**Рис. 24.** Поляризационные диаграммы стимулированного фотонного эхо, сформированного тремя импульсами резонансного излучения в чистом  ${}^{174}\text{Yb}$  на переходе 0—1 для различных случаев поляризации этих импульсов.

**Рис. 25.** Поляризационная диаграмма СФЭ, индуцированного столкновениями в смеси  ${}^{174}$ -иттербия с ксеноном (вверху) и зависимость амплитуды столкновительного СФЭ от давления буферного газа (внизу).

линейно вдоль этого импульса (рис. 24). Если второй и третий импульсы имеют линейную поляризацию, скрещенную с первым, СФЭ в чистом иттербии не возникает. В условиях сильного разбавления паров иттербия буферными атомами (ксенон) для комбинации возбуждающих импульсов типа  $\rightarrow\uparrow\uparrow$  возникает индуцированное столкновениями СФЭ с немо-

тонной зависимостью амплитуды от давления буферного газа и с линейной поляризацией, параллельной поляризации первого возбуждающего импульса (рис. 25). Природа возникновения СФЭ, индуцированных столкновениями, связана с различием в скоростях релаксации ориентации и выстраивания верхнего рабочего уровня указанного перехода.

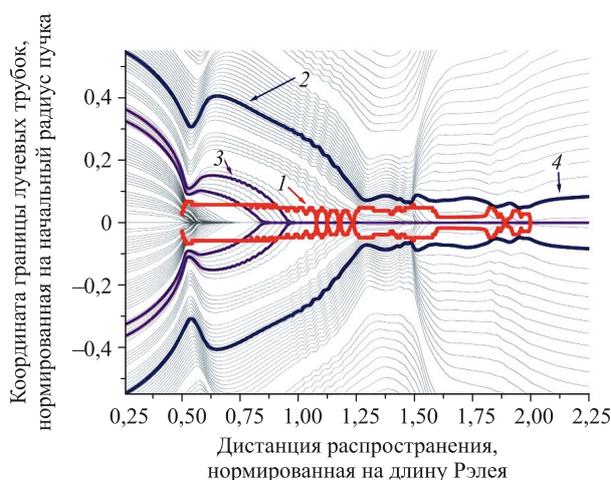
### Программа П.8.3. Фундаментальные проблемы оптики и дистанционного зондирования атмосферы (координатор докт. физ.-мат. наук Г. Г. Матвиенко)

В Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева разработана современная концепция самофокусировки света, на основе которой создаются модели процессов распространения лазерного излучения в средах, обеспечивающие прогресс в развитии лазерных технологий, экологии, биофизике, атмосферной оптике. Установлен новый класс энергетических структур в физике нелинейных волн — дифракционно-лучевые трубки в самофокусирующей диссипативной среде. Их взаимодействия вдоль дистанции распространения мощного света формируют устойчивые по физическим характеристикам области локализации световой энергии — плазменный филамент и постфиламентационный световой канал, а также консервативную периферию (рис. 26). Стабилизация границ указанных областей обеспечивается дополнительным, имеющим дифракционную природу, поджатием со стороны периферии. С использованием концепции объяснены такие обнаруженные авторами явления, как зависимость длины филаментации лазерного импульса от мощности и радиуса пучка, а также факт сохранения высокой интенсивности в постфиламентационном световом канале.

В этом же Институте разработана динамическая эмпирическая модель оптических характеристик аэрозоля в нижнем 5-километровом слое атмосферы Западной Сибири. В основе модели — полученные в результате многолетнего самолетного зондирования данные о коэффициентах направленного рассеяния, дисперсном составе атмосферного аэрозоля и содержании поглощающих частиц (рис. 27). Модель предусматривает восстановление оптических характеристик аэрозоля в видимой и ближней ИК-областях спектра: комплексного показателя преломления, коэффициентов рас-

сеяния и поглощения, аэрозольной оптической толщи, индикатрисы рассеяния излучения аэрозольными частицами (рис. 28). В модели заложена возможность многовариантного учета априорной информации, такой как внешние сезонные, синоптические признаки и измеряемые оптические и метеорологические параметры. Модель может быть использована для расчета климатически значимых параметров тропосферного аэрозоля и радиационного баланса системы Земля—атмосфера в коротковолновом спектральном диапазоне.

В Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева совместно с Институтом солнечно-земной физики введен интегральный масштаб, характеризующий атмосферу в целом, — эффективный внешний масштаб турбулентности



**Рис. 26.** Энергетические структуры при филаментации лазерного импульса в воздухе: граница плазменного филамента (1), граница постфиламентационной трубки (2), пример восполнения энергией плазменного филамента из лучевой трубки (3), постфиламентационный световой канал (4).

$L_0^*$ . Предложен оптический способ определения этого масштаба из измерений дисперсии дрожания изображения внеатмосферного источника для нескольких значений приемной апертуры. Для получения экспериментальных данных был использован автоматизированный горизонтальный солнечный телескоп (АСТ), снабженный датчиком Брандта, работающий на основе дрожания изображения края солнечного диска. Измерения проводились в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН в 2010—2011 гг. (рис. 29). По этим экспериментальным данным был определен эффективный внешний масштаб турбулентности атмосферы. Оказалось, что его значение для дневной турбулентности составляет 8—12 м. Доказана возможность обнаружения в атмосфере когерентных оптических структур на основе эффекта

резкого уменьшения флуктуаций оптических волн (на рис. 29 это соответствует экспериментальным точкам, концентрирующимся около прямой линии в нижней части рисунка). Обнаруженный эффект имеет большое значение как для повышения точности оптических измерителей атмосферной турбулентности, так и для создания астрономических систем адаптивной оптики.

В Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева разработан новый метод расчета уровней энергии многоатомных молекул, основанный на теории возмущений (ТВ) и суммировании расходящихся рядов. Предложенный метод впервые позволяет вычислять уровни энергии высоковозбужденных колебательных состояний и исключает необходимость учитывать случайные резонансы. Помимо это-

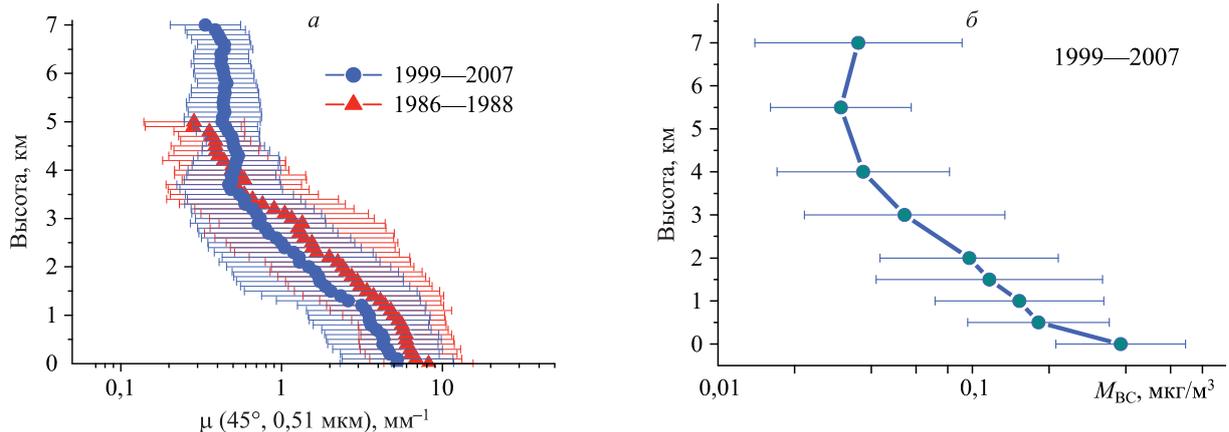


Рис. 27. Сопоставление средних высотных профилей коэффициента аэрозольного рассеяния  $\mu_0$  по данным самолетных измерений (а) и среднего высотного профиля массовой концентрации «сажи»  $M_{\text{вс}}$  (б).

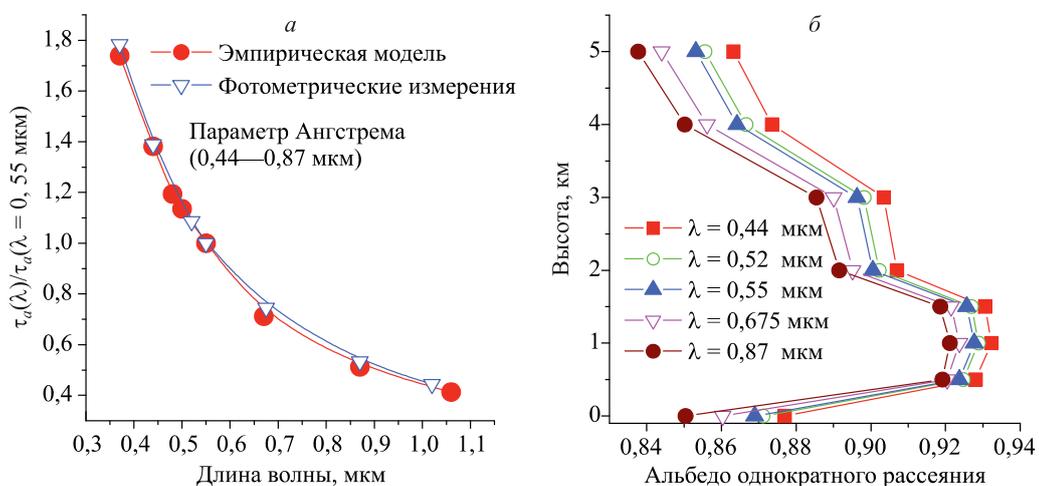
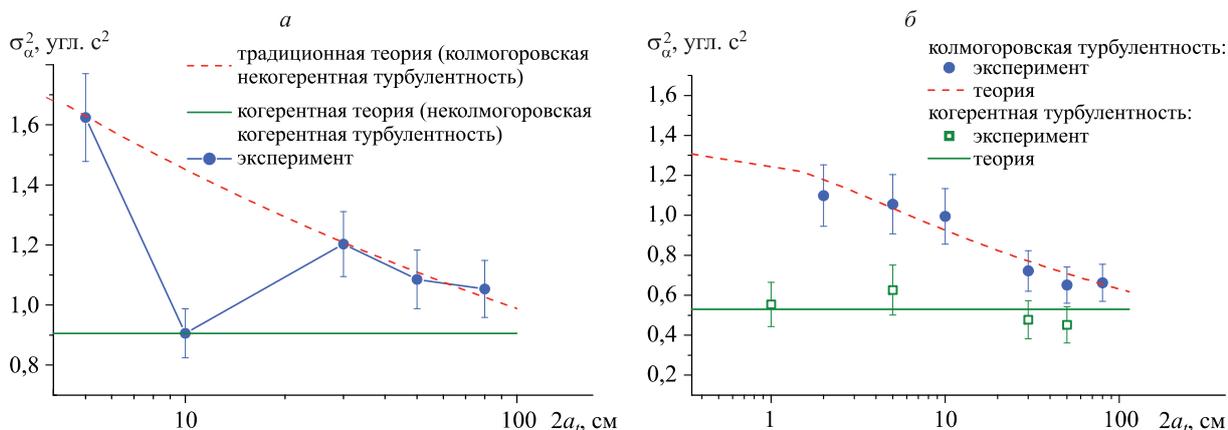
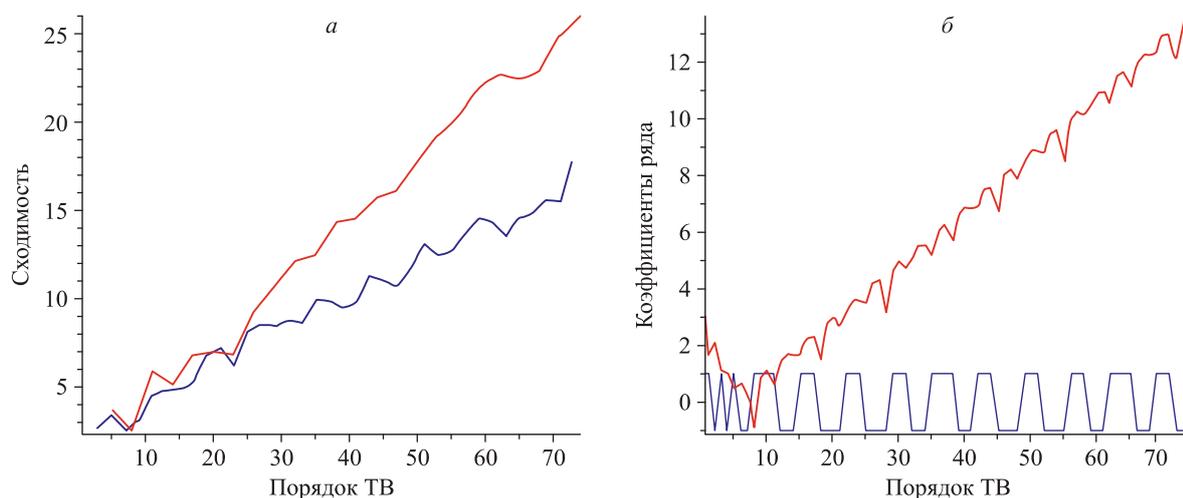


Рис. 28. Спектральный ход нормированной аэрозольной оптической толщи по данным многолетних самолетных и наземных фотометрических измерений (а); вертикальный профиль альбеда однократного рассеяния (б) по данным самолетных измерений (лето).



**Рис. 29.** Дисперсия  $\sigma_\alpha^2$  дрожания изображения края солнечного диска в зависимости от диаметра входной апертуры телескопа  $2a_t$ , данные летних измерений 2010 г. (а) и 2011 г. (б).



**Рис. 30.** Суммирование ряда теории возмущений (ТВ) Рэля—Шредингера для колебательного состояния (020) молекулы HD<sup>16</sup>O:

а — сходимость ряда (характеризуется логарифмом относительной разности результата суммирования и вариационного расчета) в зависимости от порядка теории возмущений для метода Паде (синяя линия) и метода Паде—Эрмита (красная линия); б — значение коэффициентов ряда в зависимости от порядка теории возмущений (красная линия), синяя линия показывает знаки коэффициентов.

го, метод заметно упрощает алгоритм расчета. Для вычисления поправок к энергии используются рекуррентные соотношения теории возмущений Рэля—Шредингера. Изучение аналитических свойств функции энергии, представленной разложением в ряд по степеням параметра возмущения, позволило получить асимптотические оценки для поправок высоких порядков. Суммирование рядов с помощью аппроксимантов Паде—Эрмита (рис. 30, а) позволило рассчитывать уровни энергии, несмотря на быструю расходимость рядов (рис. 30, б),

обусловленную наличием случайных резонансов. Метод предназначен, в первую очередь, для расчетов колебательных и колебательно-вращательных уровней энергии и волновых функций различных молекул в широком спектральном диапазоне, а также может быть применен для решения некоторых других задач колебательно-вращательной спектроскопии (определение колебательных частот и параметров потенциальной функции молекул на основе известных спектров и т. д.).