

## ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ П.10.

**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**

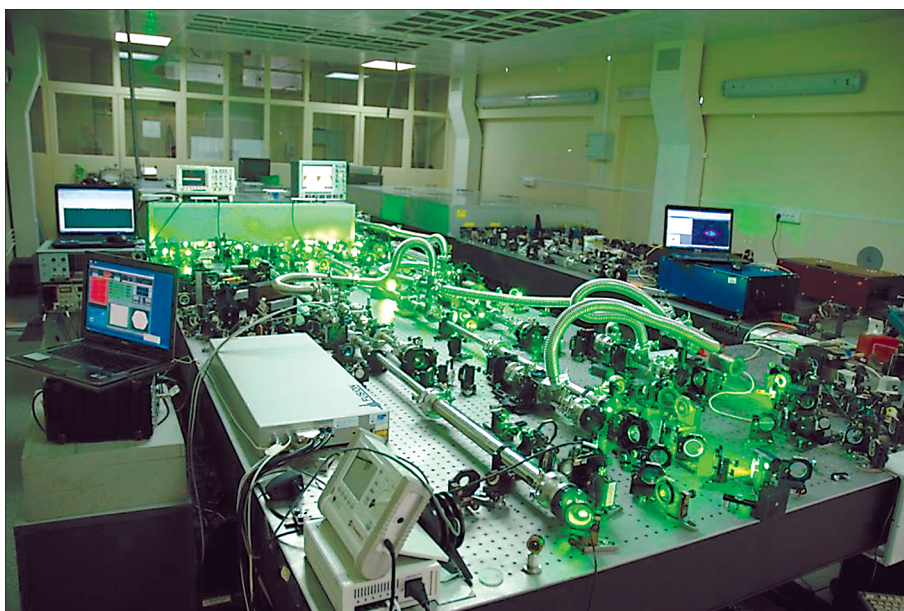
**Программа П.10.1. Современные проблемы физики сверхсильных световых полей и их приложений. Спектроскопия сверхвысокого разрешения, стандарты частоты, оптические часы, прецизионные оптические измерения, проблемы квантовой и атомной оптики (координатор акад. С. Н. Багаев)**

В Институте лазерной физики СО РАН в двухканальном варианте фемтосекундной лазерной системы с параметрическими каскадами усиления (рис. 13) впервые в мире экспериментально осуществлено когерентное сложение оптических полей фемтосекундных импульсов с энергией до 150 мДж. При фокусировке излучения параболическим зеркалом достигается интенсивность излучения, превышающая релятивистский предел на два–три порядка ( $10^{20}$ – $10^{21}$  Вт/см<sup>2</sup>), что открывает возможность постановки экспериментальных исследований по релятивистской оптике.

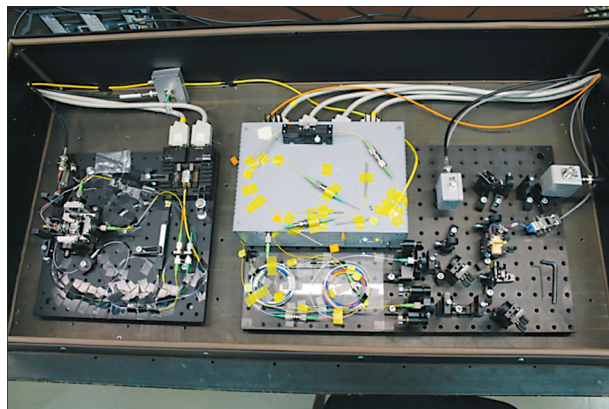
В этом же Институте проведены эксперименты по наблюдению резонансов Рамси–Борде в ансамбле ультрахолодных атомов магния

на интеркомбинационном переходе (длина волны 457 нм). Получены рекордные в России значения ширины (500 Гц) и фактора качества ( $1,3 \times 10^{12}$ ) резонанса в оптическом диапазоне, что является существенным шагом вперед на пути создания оптического стандарта частоты на ультрахолодных атомах магния с относительной неопределенностью лучше  $10^{-16}$ .

В этом же Институте впервые в России создан мобильный волоконный фемтосекундный синтезатор оптических частот с использованием разработанного гибридного высоконелинейного волокна (рис. 14). Такая конструкция позволяет существенно уменьшить габариты, увеличить когерентность выходного суперконтинуума и, следовательно, обеспечить высокую



**Рис. 13.** Фемтосекундная лазерная система с когерентным сложением полей.



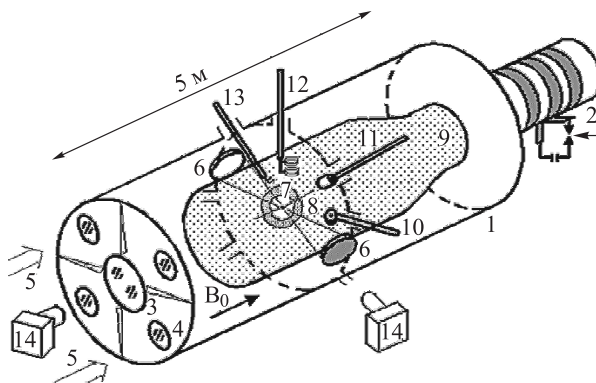
**Рис. 14.** Макет волоконного фемтосекундного синтезатора частот ИЛФ СО РАН (внешний вид оптической части).

степень стабилизации выходных частот. Таким образом, синтезатор способен обеспечить перенос долговременной стабильности всех известных на сегодня оптических стандартов частоты в синтезируемые частоты оптического и радиодиапазона, что позволяет создавать на его основе прецизионные оптические часы, в частности, для системы ГЛОНАСС.

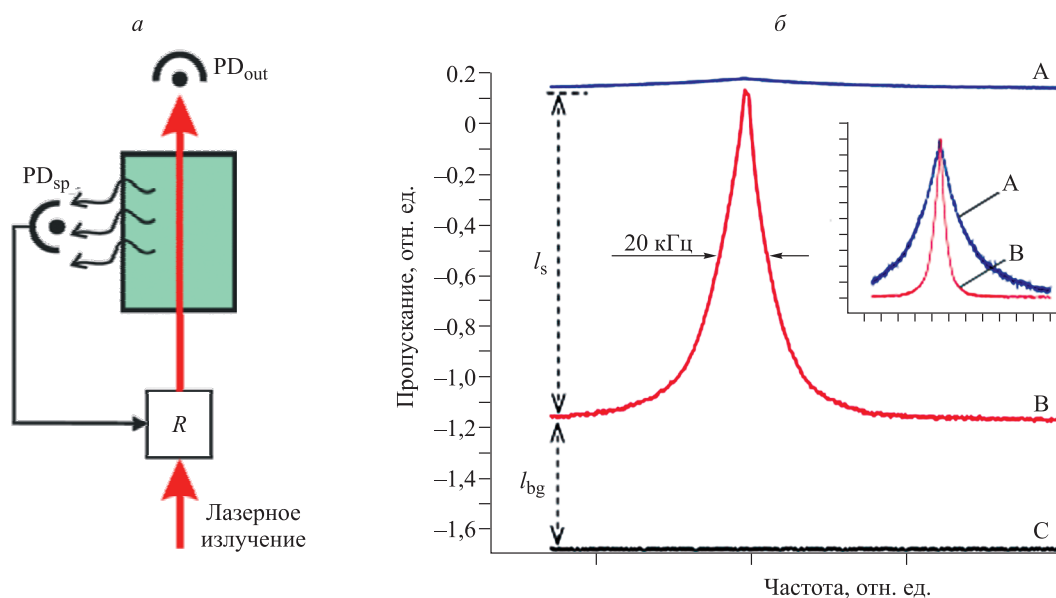
В Институте лазерной физики СО РАН впервые проведены опыты по бесстолкновительному взаимодействию расширяющейся лазерной плазмы с водородной фоновой плазмой в поперечном магнитном поле на большом масштабе  $\sim 1$  м (рис. 15), обеспечивающем замагниченность ионов как основное условие формирования сильных возмущений фоновой плазмы, подобных бесстолкновительным ударным волнам (БУВ). За счет оптимизации режима создания лазерной плазмы с энергией до 100 Дж в единичном телесном угле разлета впервые были достигнуты требуемые рекордные параметры: значение параметра бесстолкновительного магнитного ламинарного механизма взаимодействия  $\delta \sim 1$  (при начальных числах Альфвена–Маха  $M_A \approx 6-7$  у лазерной плазмы). Это более чем в 3 раза превышает величину  $\delta$  как в предшествующих экспериментах на стенде КИ-1 в ИЛФ СО РАН, так и в

современных опытах по программе генерации БУВ в Лос-Аламосе и Ливерморе (США).

В том же Институте предложен новый спектроскопический метод, позволяющий радикально увеличить амплитуду, контраст и фактор качества нелинейных оптических резонансов, в котором используется управление параметрами входящего пробного поля посредством электронной петли обратной связи с целью стабилизации отклика среды на фиксированном постоянном уровне (рис. 16). При этом спектроскопическая информация содержится в меняющихся с частотой параметрах входящего пробного поля. В рамках этого подхода найден универсальный и простой способ, использующий спонтанное излучение для управления в цепи обратной связи, драматического увеличения амплитуды, контраста и фактора качества различных атомных резонансов. Метод получил экспериментальное подтверждение в случае спектроскопии резонансов когерентного пленения населенностей в парах рубидия, где были наблюдаемы увеличение амплитуды резонанса на два порядка и трехкратное уменьшение его ширины. В результате фактор качества резонанса достиг рекордной величины 260 %.



**Рис. 15.** Установка КИ-1 в ИЛФ СО РАН для моделирования взрывающейся плазмы в космосе: 1 – вакуумная камера; 2 – источник фоновой плазмы (9); 3 – стеклянное окно; 4 – NaCl-окна для лазерных лучей (5); 6 – система фокусировки лучей; 7, 8 – мишень и облако плазмы; 10–13 – различные диагностические зонды; 14 – ЭОП для мгновенных снимков.



**Рис. 16.** Принципиальная схема нового метода (а) и экспериментальные результаты (б), демонстрирующие увеличение амплитуды и уменьшение ширины резонанса. Кривые А и В – сигнал фотодетектора ( $PD_{out}$ ) при выключенной и включенной цепи обратной связи соответственно. На врезке – нормированные резонансные кривые для обоих случаев.

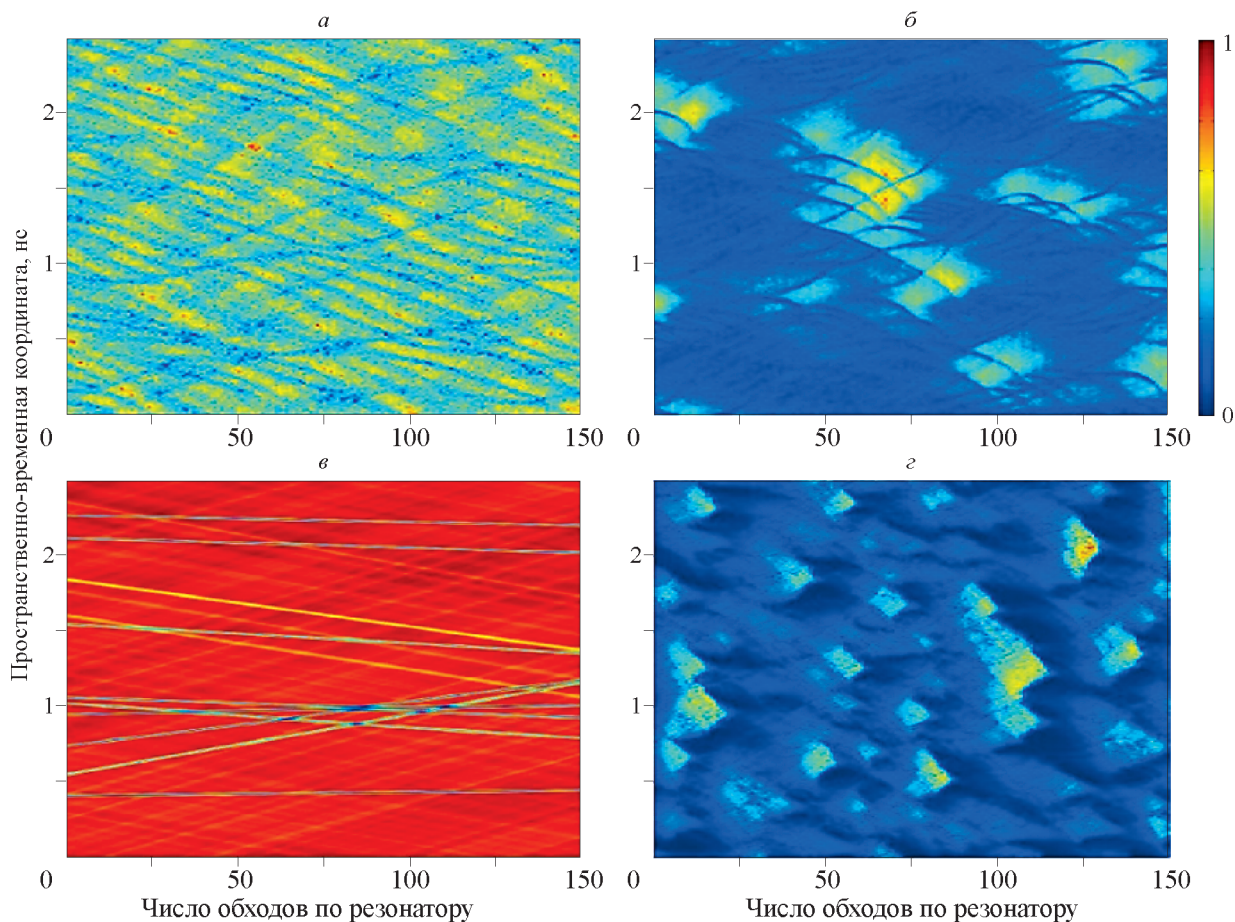
### Программа П.10.2. Фундаментальные проблемы взаимодействия лазерного излучения с однородными и структурированными средами (координатор акад. А. М. Шалагин)

В Институте автоматики и электрометрии совместно с Институтом проблем передачи информации РАН, Новосибирским государственным университетом, Университетом Астон, Бирмингем (Великобритания), и Вайцмановским институтом науки, Реховот (Израиль), изучен переход от ламинарного состояния к турбулентному для световых волн, по аналогии с гидродинамической турбулентностью (рис. 17). На примере многомодового волоконного ВКР-лазера продемонстрировано, что ламинарный режим соответствует стабильной генерации с узким спектром (так называемый конденсат с высокой когерентностью) и наблюдается при малых мощностях генерации. При увеличении мощности выше некоторой критической происходит скачкообразный переход к турбулентному режиму из-за потери пространственной когерентности. При этом спектр генерации резко уширяется и стохастизируется. Показано, что переход к турбулентности происходит из-за разрушения конденсата за счет образования и кластеризации темных и серых солитонов.

В Институте автоматики и электрометрии совместно с Институтом физики полупроводников им. А. В. Ржанова обнаружены необычные плазмоны, возбуждаемые неоднородной волной в узкой щели в периодическом массиве

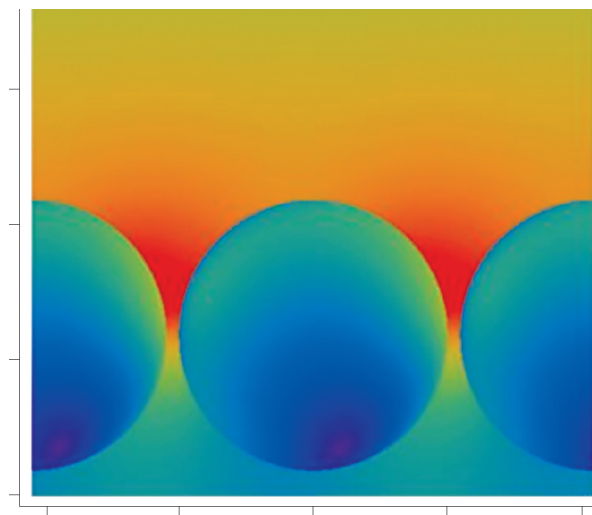
нанопроволок, лежащем на диэлектрической подложке (рис. 18). Неоднородная волна появляется, когда исходная плоская волна падает на границу подложки под углом полного внутреннего отражения. Обнаружено, что плазмонный резонанс имеет резкую зависимость от угла падения. Это свойство делает резонанс перспективным для приложений в «умных» перестраиваемых устройствах плазмоники.

В Институте автоматики и электрометрии предложена и реализована полностью волоконная схема оптического параметрического генератора (ВОПГ) с накачкой непрерывным итербиевым волоконным лазером. В качестве нелинейной среды применен двулучепреломляющий фотонно-кристаллический волоконный световод. Демонстрирована возможность перестройки ВОПГ в диапазоне 0,92–1,2 мкм при перестройке лазера накачки на 4 нм (рис. 19, а). При этом перестраиваемая генерация ВОПГ в области  $\leq 1$  мкм получена впервые. Выходная мощность и дифференциальная эффективность достигают 460 мВт и 15 % соответственно при накачке неполяризованным излучением (рис. 19, б), что в разы превышает продемонстрированные ранее параметры непрерывных ВОПГ с преобразованием излучения в высокочастотную область спектра.



**Рис. 17.** Экспериментальные (*a*, *б*) и расчетные (*в*, *г*) пространственно-временные распределения интенсивности в зависимости от числа обходов световых волн по резонатору лазера в ламинарном (*a*, *в*) и турбулентном (*б*, *г*) режимах.

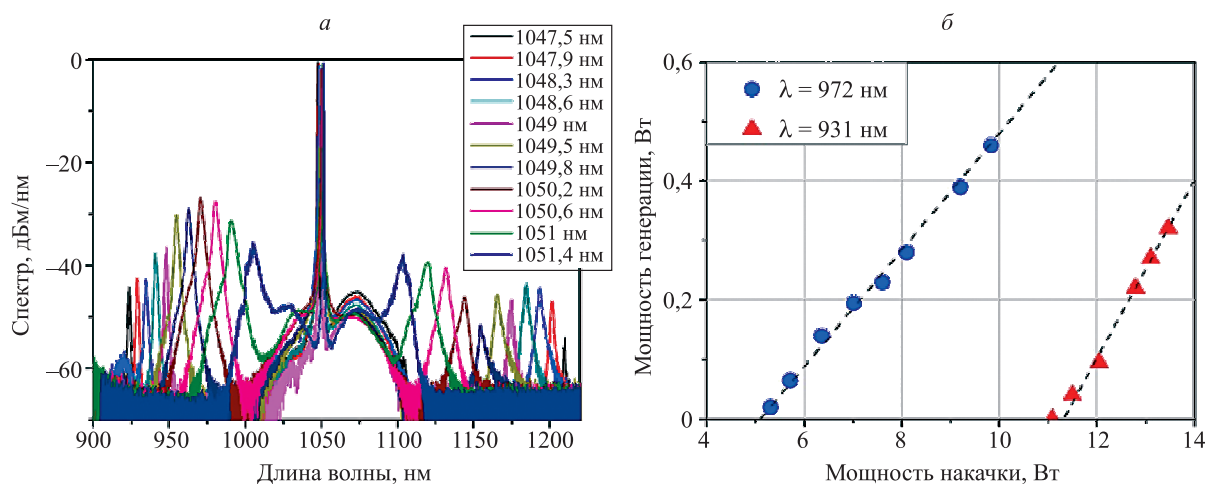
В этом же Институте экспериментально обнаружено новое явление – подавление спонтанного излучения в газовой смеси изотопов  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{22}\text{Ne}$ . Эффект проявляется в виде узких оптико-магнитных резонансов (ОМР) измене-



**Рис. 18.** Распределение ближнего поля в окрестности цилиндров.

ния интенсивности свечения газа при сканировании продольного магнитного поля (рис. 20). Положение ОМР ( $\pm 1400$  Гс и  $\pm 900$  Гс) отвечает резонансным условиям, когда изотопический сдвиг компенсируется с помощью эффекта Зеемана. Малые ширины ОМР свидетельствуют о подавлении эффекта Доплера, т. е. атомы разных изотопов, дающих вклад в резонансы, покоятся друг относительно друга. В этих условиях имеет место коррелированное спонтанное излучение пары изотопов с уменьшенной вероятностью. Изотопические ОМР наблюдаются при низком давлении газа  $p \approx 0,2$  мм рт.ст. и в узком интервале изменения давления –  $\Delta p/p \sim 0,1$ . Для образования ОМР требуется присутствие обоих изотопов –  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{22}\text{Ne}$ . Резонансы в области  $\pm 1400$  Гс обусловлены уменьшением свечения газовой смеси. Полученные результаты не противоречат гипотезе об образовании перепутанных состояний пары атомов разных изотопов неона.

Для интерферометрического контроля формы нового 6-метрового зеркала Большого азимутального телескопа РАН в Институте



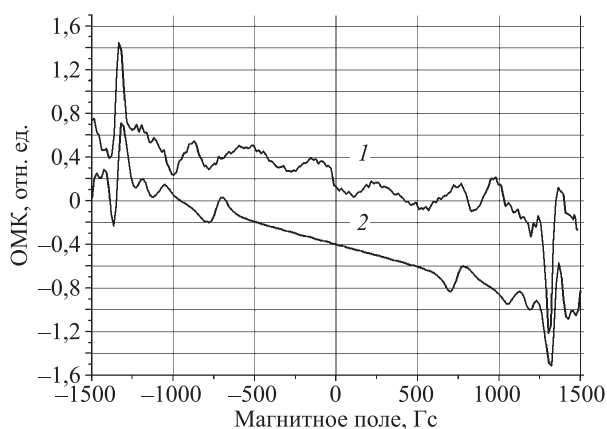
**Рис. 19.** Область перестройки ВОПГ при изменении длины волны накачки вблизи 1050 нм (а) и экспериментальная зависимость мощности генерации на длинах волн 931 нм (треугольники) и 972 нм (кружки) от мощности накачки на входе в световод (б). Штриховыми линиями показана линейная экстраполяция экспериментальных данных.

автоматики и электрометрии разработаны и изготовлены эталонные дифракционные оптические элементы (ДОЭ): дифракционный корректор и имитатор. Разработаны и исследованы методы контроля и юстировки их взаимного положения в пространстве по вспомогательным голограммам с погрешностью менее 0,5 мкм на расстоянии в несколько метров. Экспериментально показано, что погрешность формирования эталонного асферического волнового фронта  $W_{асфер}$  не превышает 5 нм.

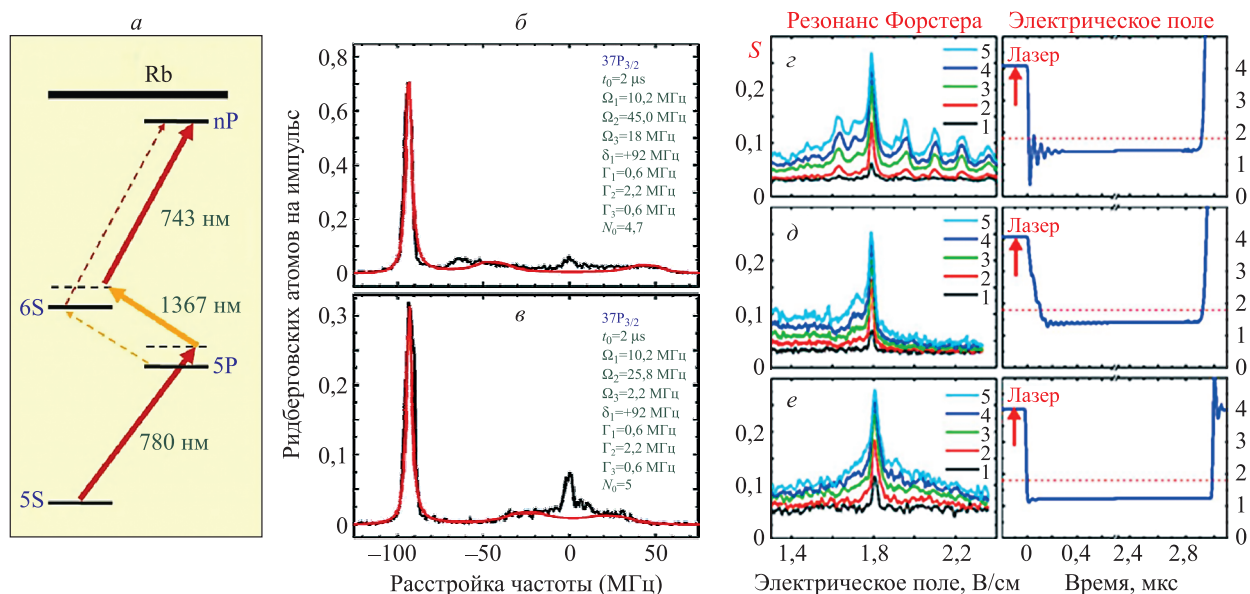
В Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова выполнены эксперименты по спектроскопии трехфотонного возбуждения  $5S \rightarrow 5P \rightarrow 6S \rightarrow nP$  холодных ридберговских атомов Rb в выключенной магнитооптической ловушке (МОЛ). Лазер первой ступени с длиной волны 780 нм имел синюю отстройку  $\delta_1 = +92$  МГц от перехода  $5S \rightarrow 5P$ , лазер второй ступени с длиной волны 1367 нм был настроен в точный резонанс с переходом  $5P \rightarrow 6S$ , а лазер третьей ступени сканировался в окрестности перехода  $6S \rightarrow nP$  (рис. 21, а). Сравнение с численными расчетами (красные кривые на рис. 21, б, в) показало хорошее согласие теории и эксперимента при учете конечных ширины линий лазеров.

В этом же Институте выполнены эксперименты по наблюдению электрически управляемого резонанса Ферстера  $Rb(37P) + Rb(37P) \rightarrow Rb(37S) + Rb(38S)$  для 1–5 регистрируемых ридберговских атомов при трехфотонном воз-

буждении непрерывными лазерами с использованием штарковского переключения уровней. Получены узкие резонансы, форма которых зависит от формы управляющих электрических импульсов (рис. 21, з, д). Обнаружено, что в присутствии импульса радиочастотного (РЧ) поля с частотой 20 МГц возникают дополнительные резонансы Ферстера, поскольку вынужденное поглощение или испускание РЧ-фотонов компенсирует дефект энергии резонанса Ферстера (см. рис. 21, з).



**Рис. 20.** Пример экспериментальной производной оптико-магнитного контура, на котором отчетливо наблюдается несколько резонансов, центрированных в области  $\pm 900$  Гс и в области  $\pm 1400$  Гс (1), и расчетный контур, когда учтены изотопические сдвиги в мультиплете  $2p-1s$  (2).



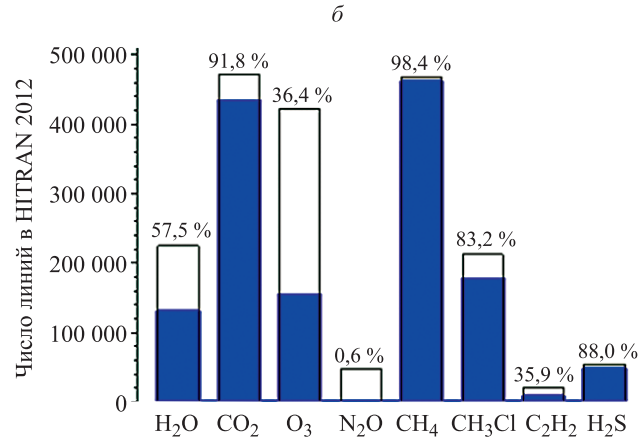
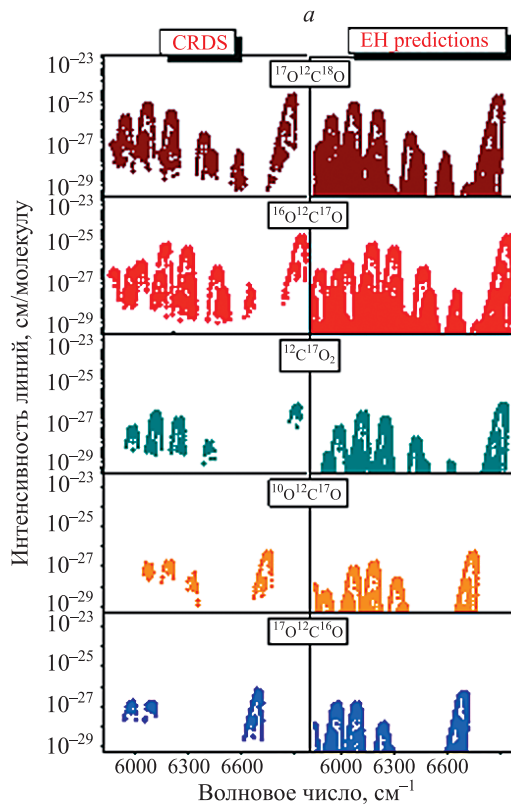
**Рис. 21.** Схема трехфотонного возбуждения ридберговских состояний nP в атомах Rb (а), записи спектра трехфотонного возбуждения при разных интенсивностях лазера второй ступени (б, в), зависимость формы резонанса Ферстера для 1–5 регистрируемых ридберговских атомов от формы электрических импульсов, включающих и выключающих резонансное взаимодействие между ридберговскими атомами (z–e).

**Программа П.10.3. Фундаментальные проблемы оптики атмосферы, включая молекулярную спектроскопию, распространение оптических волн, атмосферную коррекцию, дистанционную диагностику окружающей среды (координатор докт. физ.-мат. наук Г. Г. Матвиенко)**

В Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева проведен анализ экспериментальных спектров высокого разрешения молекул  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CH_3Cl$ ,  $C_2H_2$ ,  $H_2S$  и их изотопических модификаций в широком диапазоне длин волн. В результате анализа осуществлена идентификация спектров и восстановлены параметры нескольких сотен тысяч спектральных линий. В рамках метода эффективных операторов проведено глобальное моделирование центров и интенсивностей спектральных линий молекул  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CH_3Cl$  и  $C_2H_2$ . Разработанные модели воспроизводят имеющуюся экспериментальную спектроскопическую информацию и предсказывают новую с точностью, близкой к точности современного эксперимента. Новая спектроскопическая информация получила высокую оценку международных экспертов, по рекомендации которых она занесена в международную базу данных HITRAN (рис. 22, а, б). Разработана интернет-доступная информационная система «HITRAN on the Web», которая позволяет в

интерактивном режиме производить выборку информации из базы данных HITRAN и рассчитывать различные спектральные функции смесей газов в различных термодинамических условиях с учетом различных аппаратных функций.

В этом же Институте разработаны методы атмосферной дистанционной когерентной доплеровской анемометрии, открывающие новые возможности в комплексном использовании когерентных лидаров для исследования и мониторинга динамических турбулентных процессов в атмосфере. Применение развитых методов позволило установить не известные ранее закономерности влияния атмосферных условий на динамику ветровых структур техногенного происхождения. В многочисленных экспериментах впервые в мировой практике найдены количественные соотношения, позволяющие оценивать время жизни самолетных вихрей (рис. 23), а также дефицит скорости и протяженность шлейфа ветровых турбин в пограничном слое атмосферы в зависимости



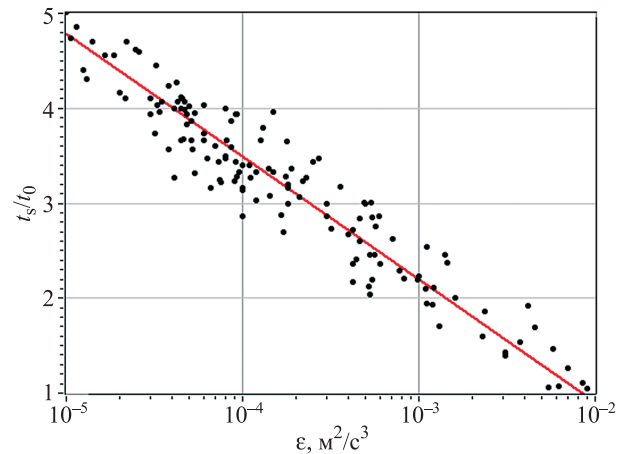
**Рис. 22.** Сравнение имеющейся экспериментальной информации в диапазоне 5800–7000 см<sup>-1</sup> (левая панель) для изотопов углекислого газа и расчетной информации (правая панель) (а) и наполнение базы HITRAN-2012 данными (синие столбцы), полученными коллективом авторов из ИОА СО РАН или этим коллективом совместно с зарубежными партнерами (б).

от силы ветра и скорости диссипации турбулентной энергии (рис. 24). Разработанные на основе полученных результатов компьютерные модели прогнозирования и новые методы статистического оценивания параметров турбулентных ветровых полей из лидарных данных используются в лидарных системах вихревой авиабезопасности и мониторинга ферм ветровых турбин.

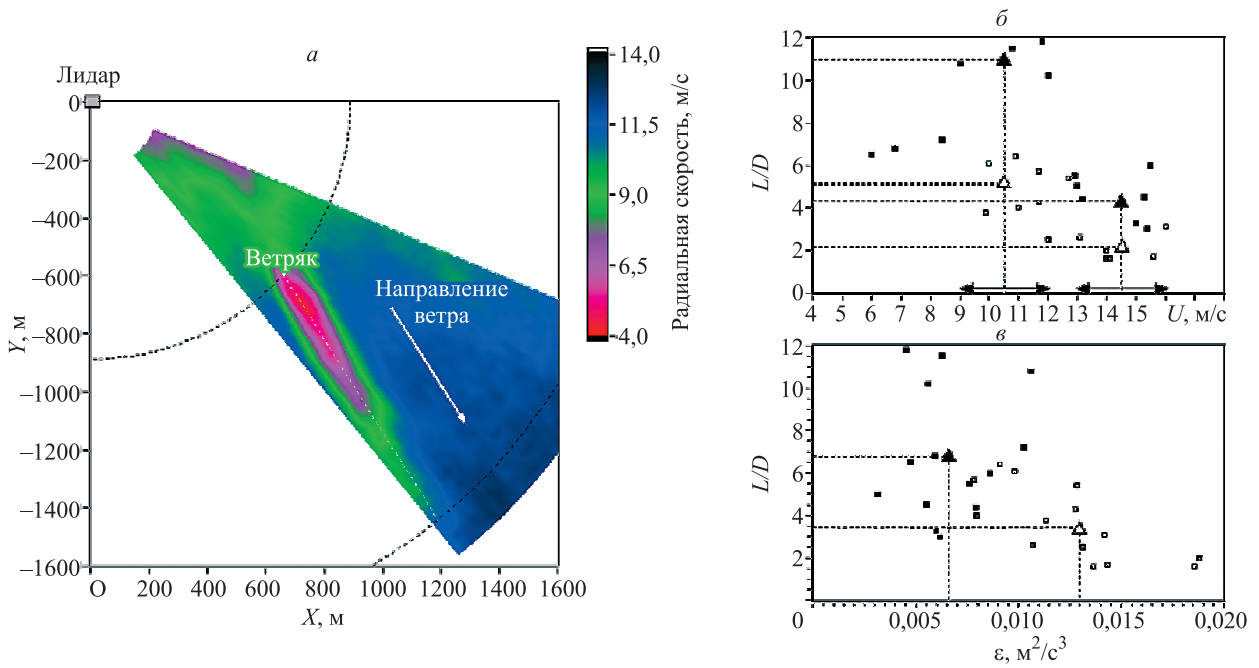
В этом же Институте впервые установлено, что вихревые лазерные пучки, несущие орбитальный угловой момент (ОУМ), обусловленный поступательно-вращательным движением световой энергии вокруг оси пучка, при распространении в турбулентной атмосфере оказываются более устойчивыми к воздействию крупномасштабных неоднородностей показателя преломления по сравнению с пучками, не обладающими ОУМ. Показано, что вызванные турбулентностью случайные блуждания пучка оказываются тем меньшими, чем более значительным является ОУМ пучка. Установлено, что из разных типов вихревых пучков, имеющих одинаковые начальные эффективные размеры и орбитальные угловые моменты, наиболее устойчивыми являются пучки, занимающие в пространстве наибольший эффективный объем (рис. 25).

В этом же Институте получена высокоточная модель поверхности дипольного мо-

мента метана. С помощью вариационных методов рассчитан спектр метана в диапазоне от 0 до 9300 см<sup>-1</sup>, что позволило провести верификацию различных баз данных. Построена усовершенствованная модель эффективного



**Рис. 23.** Зависимость нормированного времени жизни самолетного вихря  $t_s/t_0$  от скорости диссипации кинетической энергии атмосферной турбулентности  $\epsilon$ . Точками показаны одиночные оценки, а линией – расчет по эмпирической формуле. Значения  $t_s/t_0$  и  $\epsilon$  получены из данных измерения двухмикронным когерентным лидаром при сканировании зондирующим пучком в вертикальной плоскости перпендикулярно взлетно-посадочной полосе на летных полях различных аэропортов в Германии и Франции (2003–2012 гг.).

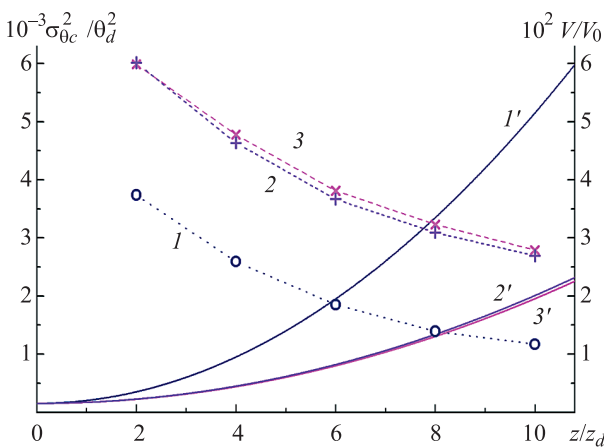


**Рис. 24.** Распределение радиальной скорости, полученное из измерений двухмикронным когерентным лидаром (а), и зависимости отношения продольного размера шлейфа ветровой турбины  $L$  к диаметру турбины  $D$  от скорости ветра  $U$  (б) и скорости диссипации энергии турбулентности  $\epsilon$  (в). Данные, показанные темными и светлыми значками, получены из лидарных измерений в ночное и дневное время соответственно. Квадратики – одиночные оценки, треугольники – усредненные оценки.

гамильтониана тетрадекады  $^{12}\text{CH}_4$  и идентифицировано более 3000 линий в диапазоне 4800–6300  $\text{cm}^{-1}$ .

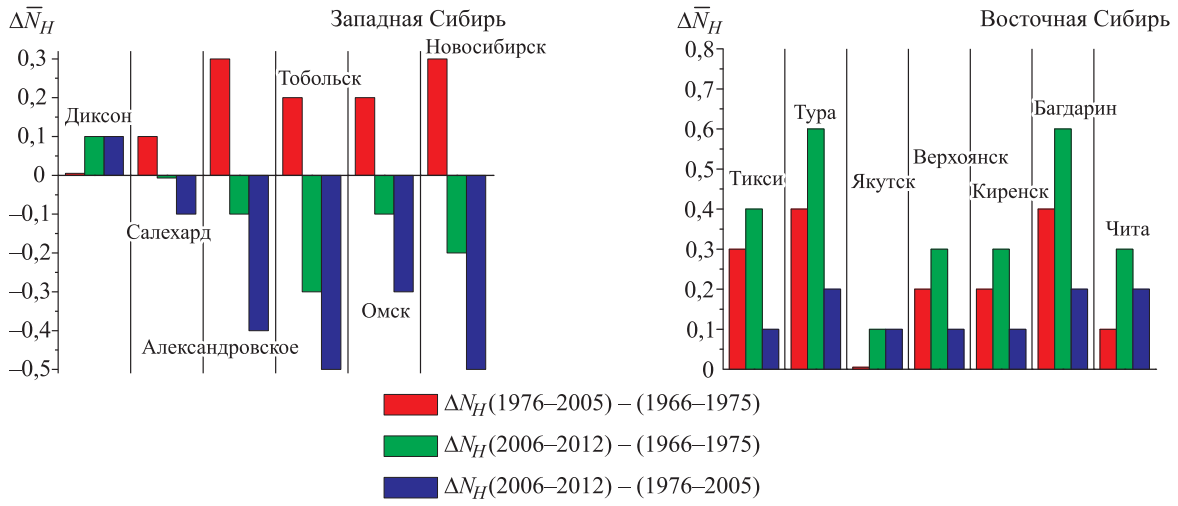
В этом же Институте при исследовании климатических изменений количества ниж-

ней облачности над территорией Сибири была применена процедура статистического сравнения его среднегодовых и среднесезонных значений по данным трех периодов: 1966–1975 гг., 1976–2005 гг. и 2006–2012 гг., первый из которых характеризуется незначительным изменением температуры, второй соответствует периоду глобального потепления, а третий отличается тенденцией к похолоданию климата. Проведенный анализ показал (рис. 26), что в 1976–2005 гг. повсеместно среднегодовое количество нижней облачности было больше, чем в 1966–1975 гг. При сравнении среднегодовой нижней облачности за 2006–2012 гг. с нормами за 1966–1975 гг. и 1976–2005 гг. выявлено увеличение ее количества над Восточной и уменьшение над Западной Сибирью, за исключением полярных районов. При этом в последние годы (2006–2012 гг.) над Восточной Сибирью наблюдается менее интенсивное увеличение, а над Западной – более интенсивное.



**Рис. 25.** Зависимость угловой дисперсии блужданий  $LG$  ( $1, 1'$ ), бesselь-гауссова ( $2$  и  $2'$ ) и гипергеометрического ( $3$  и  $3'$ ) вихревых пучков в дальней зоне дифракции за турбулентным слоем ( $r_{0n} = 2,5$ ) от толщины слоя. Непрерывные линии – эффективный объем, занимаемый в слое соответствующим пучком.  $V_0 = \pi a^2 z$ .





**Рис. 26.** Разности среднегодового количества нижней облачности  $\Delta \bar{N}_H$ , рассчитанные между периодами 1966–1975 гг., 1976–2005 гг. и 2006–2012 гг.