

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

**Отделение оптики ФИАН:
важные научные результаты 2011 года**

Москва, 2012

1. Новые данные об энергетическом распределении солнечных нановспышек по результатам эксперимента ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон (Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца)

Руководитель С.В.Кузин

Исполнители: С.А.Богачев, А.С.Ульянов, С.В.Шестов

В 2011 году было проведено широкомасштабное исследование временных профилей и полной энергии более чем 2000 солнечных нановспышек – событий с энерговыведением от 10^{24} до 10^{26} эрг, что составляет от 10^{-9} до 10^{-7} от типичной энергии большой солнечной вспышки. В этом исследовании использовались данные космических наблюдений Солнца в вакуумном УФ диапазоне (эксперимент ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон).

Ранее в результате исследований зарубежных данных о солнечных вспышках другими авторами было определено распределение вспышек по энергиям в диапазоне выше 10^{27} эрг. Было показано, что это распределение является степенным, то есть подчиняется закону $dN \propto E^{-\varphi} dE$, и имеет наклон $\varphi \approx 1,6$. В области энергий ниже 10^{26} эрг, где высвобождают свою энергию нановспышки, наклон распределения также был ранее измерен, но со значительной погрешностью. До текущего момента существовало как минимум три оценки φ : $1,79 \pm 0,08$ (Aschwanden et al., 1999; участок А – на рис.3), $2,42 \div 2,59$ (Parnell & Jupp, 1999; участок Р на рис.3) и $2,53 \div 2,59$ (Krucker & Benz, 1998; участок К – на рис.3). Различие между этими оценками, хотя и кажется незначительным, является принципиальным, так как при φ меньше 2 суммарная энергия, высвобождаемая в нановспышках, получается меньше, чем в крупных событиях, а при $\varphi > 2$, напротив, превышает ее. Источником прежней неопределенности φ в области энергий $10^{24} - 10^{26}$ эрг было то, что события в этом диапазоне являются предельно слабыми и регистрируются на пределе чувствительности. Также можно отметить низкое временное разрешение прежних наблюдений, порядка минуты, которое приводило к тому, что значительная часть событий оказывалась пропущенной.

Особенностью исследования, проведенного со спутника КОРОНАС-Фотон, помимо большого числа событий стал период наблюдений, совпавший с глубоким минимумом солнечной активности. Это позволило на фоне чрезвычайно спокойной короны Солнца с высокой точностью измерить энергию наиболее слабых событий с энергией в диапазоне от 10^{24} до 10^{25} эрг (рис.1). Другой особенностью стало рекордное временное разрешение наблюдений, около 4 секунд (рис.2), что более чем в 10 раз превышает обычное разрешение в этом диапазоне (спутники SOHO, TRACE). В совокупности это позволило провести наиболее точное на настоящий момент исследование энергетического распределения нановспышек (рис.4) и получить следующие результаты:

1. распределение нановспышек в диапазоне энергий $10^{24} - 10^{26}$ эрг действительно является степенным с наклоном близким к двум;
2. полученное значение наклона находится в области $\varphi > 2$ и по нашим оценкам составляет $2,59 \pm 0,38$.

Значение наклона в энергетическом распределении $\varphi > 2$ позволяет сделать главный вывод о том, что основная вспышечная энергия Солнца заключена в области энергий ниже 10^{27} эрг, то есть в нановспышках. Также видно, что в диапазоне энергий $10^{24} - 10^{26}$ эрг еще не наблюдается «обрезание» спектра, которое неизбежно при конечной суммарной вспышечной энергии Солнца. По всей вероятности точка перелома в энергетическом спектре находится в области энергий ниже 10^{24} эрг.

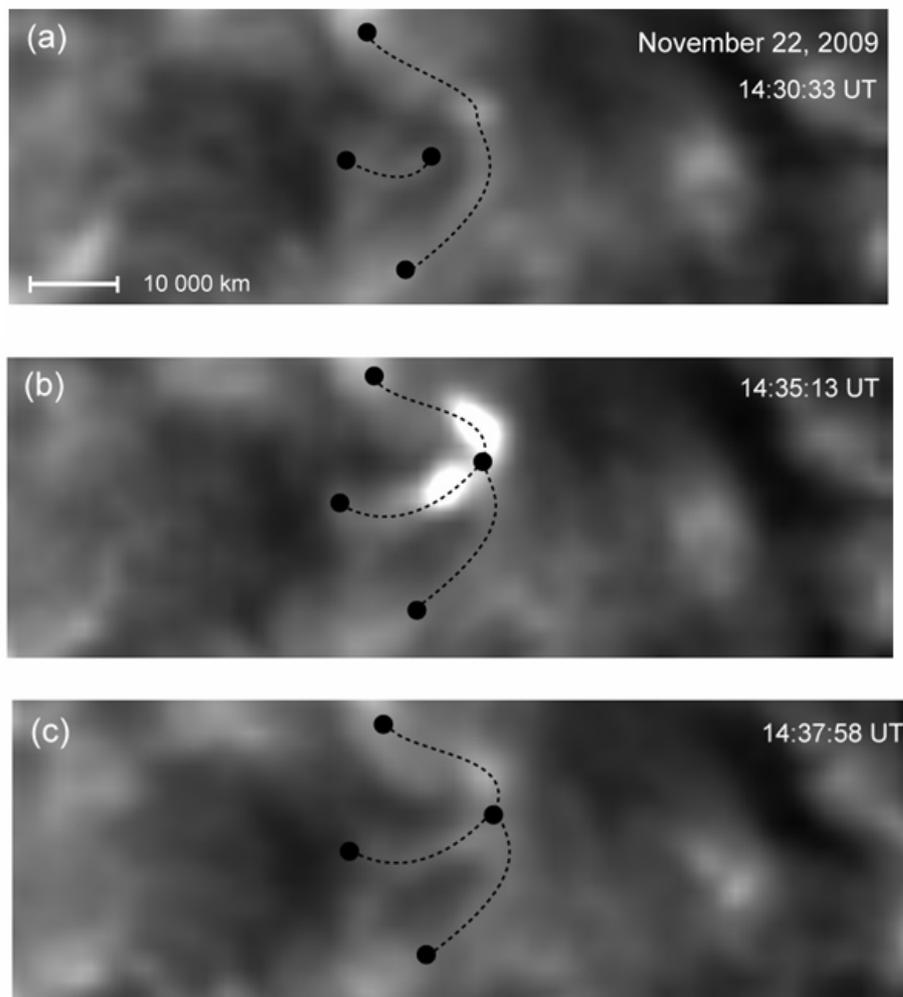


Рис.1. Серия изображений, демонстрирующая различные стадии солнечной нановспышки; моменты времени указаны на снимках.

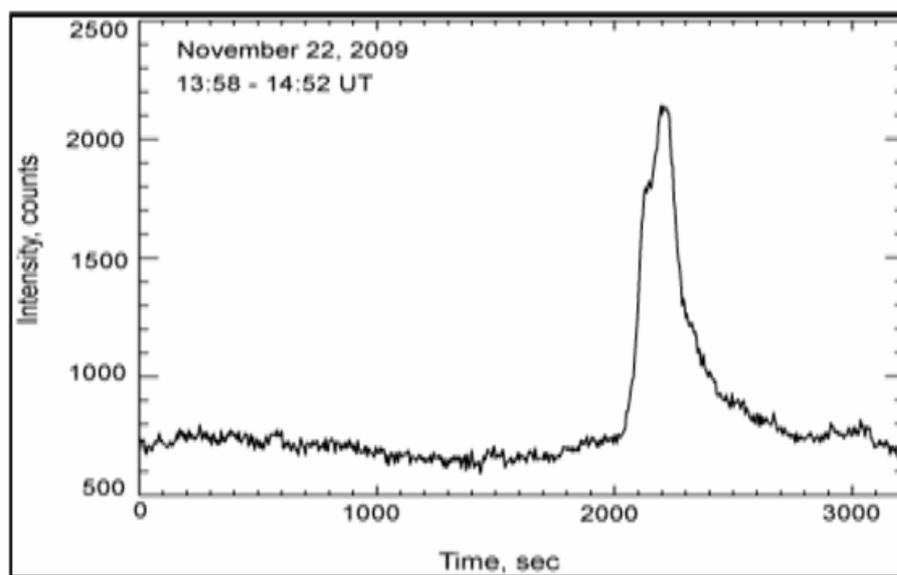


Рис.2. Характерный временной профиль интенсивности солнечной нановспышки.

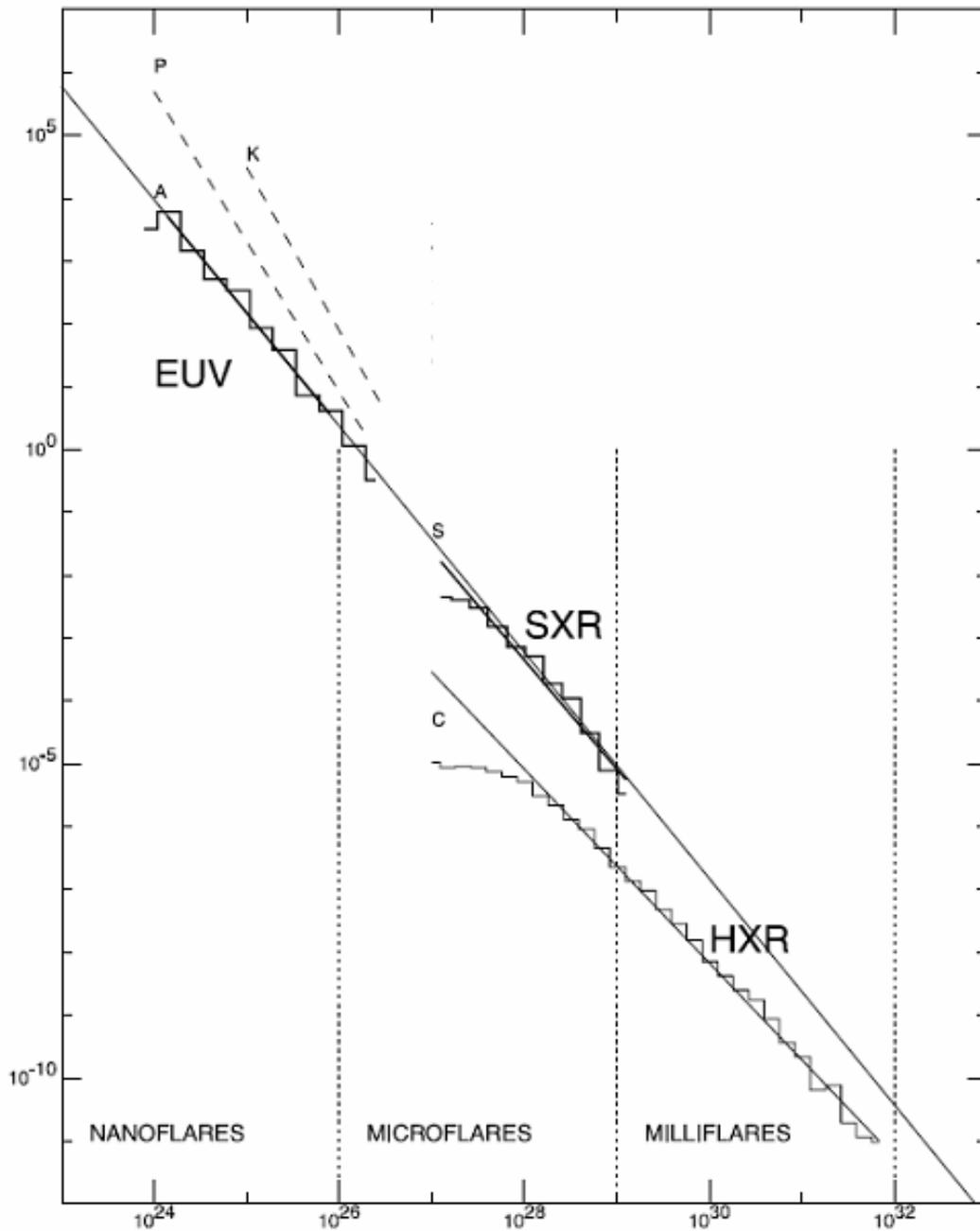


Рис.3. Распределение по энергиям солнечных вспышек в диапазоне $10^{24} - 10^{32}$ эрг по данным других авторов; по горизонтальной оси – энергия в эргах, по вертикальной оси – плотность вероятности в относительных единицах.

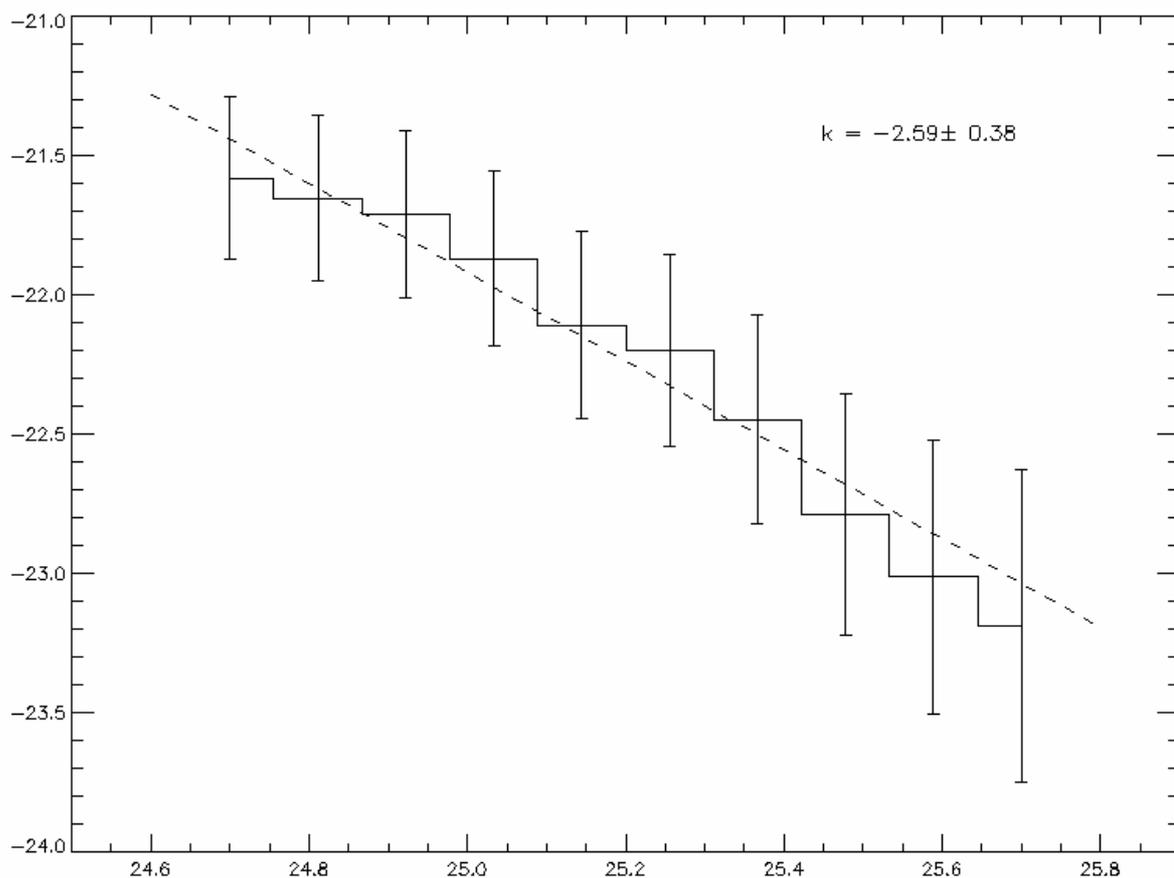


Рис.4. Распределение по энергиям солнечных вспышек в диапазоне $10^{24} - 10^{26}$ эрг, полученное по результатам эксперимента КОРОНАС-Фотон; по горизонтальной оси – десятичный логарифм энергии в эргах, по вертикальной оси – плотность вероятности в относительных единицах.

2. Наблюдение аномально сильного разрушения озонного слоя в Северном полушарии (Лаборатория спектроскопии миллиметровых волн)

Руководитель С.Б.Розанов

Исполнители: С.В.Соломонов, Е.П.Кропоткина, А.С.Завгородний, А.Н.Игнатъев, А.Н.Лукин

При проведении регулярного мониторинга озонового слоя в атмосфере Земли в 2011 году было обнаружено аномально сильное разрушение озонного слоя с образованием «озонной дыры» в Северном полушарии в области стратосферного полярного вихря. Измеренное уменьшение содержания озона в воздухе над Москвой в марте-апреле достигало 30-35% относительно профилей озона вне вихря.

Исследования атмосферного озона O_3 на миллиметровых радиоволнах ведутся в Лаборатории спектроскопии миллиметровых волн ФИАН (Отделение оптики, Отдел спектроскопии) с 1987 года. При этом выполняется мониторинг вертикального распределения озона в стратосфере и мезосфере над Москвой. Задачами мониторинга являются:

- 1) получение данных об эволюции озонного слоя в условиях естественных возмущений, включая сильные стратосферные потепления, неконтролируемых техногенных загрязнений, изменений теплового режима атмосферы, её динамики, состава и климата;
- 2) оперативное определение состояния озонного слоя;
- 3) валидация спутниковых измерений.

Диапазон высот зондирования составляет примерно 12-75 км днём и 12-95 км ночью. Тепловое излучение атмосферы на частотах вращательной спектральной линии озона $10_{0,10} - 10_{1,9}$ (центральная частота перехода 142,175 ГГц, длина волны 2,1 мм) регистрируется высокочувствительным многоканальным радиоспектрометром (озонометром), разработанным в ФИАН. До высот 70-75 км уширение спектральных линий озона на мм волнах определяется столкновениями молекул и пропорционально давлению (выше преобладает доплеровское уширение). Поэтому измеренный контур линии содержит информацию о вертикальном распределении озона в излучающих слоях. Для восстановления вертикальных профилей озона используются математические алгоритмы, основанные на методах Тихонова и статистической регуляризации и метеорологические данные о вертикальных профилях температуры и давления. Для восстановления ночных профилей озона на высотах 75-95 км привлекается дополнительная информация. Точность определения относительного содержания озона составляет 5-7% на высотах 20-50 км и не хуже 20-30% на других высотах при времени накопления сигнала около 1 ч.

Преимуществами микроволнового наземного мониторинга атмосферного озона перед традиционными оптическими методами,

лидарами, шарами-озонзондами помимо широкого диапазона зондируемых высот, являются возможность проведения измерений как днем, так и ночью, малая зависимость от погодных условий (наблюдения возможны в условиях облачности, тумана, умеренного снегопада) и экологическая безопасность метода (нет зондирующих излучений).

В холодные сезоны последних лет обнаружены неблагоприятные явления уменьшения содержания стратосферного озона над Москвой, наиболее значительные (до 2 раз относительно модельных значений) на высотах 25-45 км. Установлено, что эти явления в большинстве случаев связаны со смещениями к Москве стратосферного полярного вихря, содержание озона внутри которого значительно понижено. В холодное полугодие 2010-2011 гг. полярный вихрь был очень устойчивым и сохранялся необычно долго – до середины апреля, что привело к непрогнозируемому аномально сильному разрушению озонового слоя (образованию «озонной дыры») в Северном полушарии. Измеренное в ФИАН уменьшение содержания озона в воздухе полярного вихря над Москвой в марте-апреле 2011 г. достигало 30-35% относительно профилей озона вне вихря (рис. 1). Полученные данные важны для оценки экологической ситуации в регионах аномалий. Кроме того, они дают необходимые сведения для создания моделей атмосферы, позволяющих прогнозировать локальные и глобальные атмосферные события.

Сравнение результатов измерений профилей озона над Москвой в 2005-2011 гг. с данными микроволнового лимбового зондировщика MLS, установленного на спутнике Aura, показало хорошее соответствие профилей, полученных с поверхности Земли и из космоса.

Работы, проводимые в Лаборатории спектроскопии ММ волн ФИАН в содружестве с академическими институтами (ИПФ РАН, ИРЭ РАН, ИФА РАН и др.), ведущими вузами (МГУ, МГТУ, СПбГТУ и др.) и научно-промышленными организациями при поддержке Программ ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и «Радиоэлектронные методы в исследовании окружающей среды и человека», направлены на развитие аппаратной и методической базы радиофизического мониторинга атмосферы с перспективой создания отечественной наземной сети такого мониторинга как части глобальной сети контроля за состоянием и составом атмосферы.

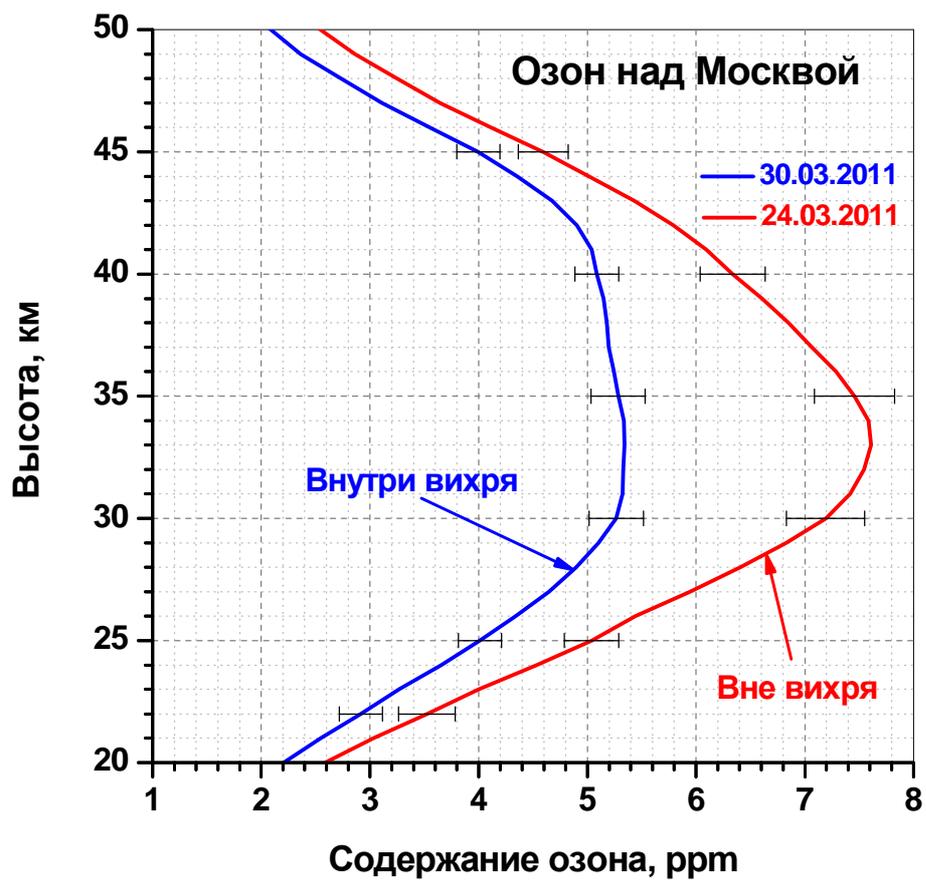


Рис.1. Профили вертикального распределения озона над Москвой, измеренные в конце марта 2011 г.

3. Обнаружение микротечей воды в вакуумных камерах (Отдел оптики низкотемпературной плазмы)

Руководитель В.Н.Очкин

Исполнители: О.Н. Афонин, С.Ю. Савинов, С.Н. Цхай

Данный метод обнаружения микротечей воды в вакуумных камерах разработан для крупных вакуумных камер сложных электрофизических установок (токамаки, ТВЭЛы ядерных реакторов, плазмохимические реакторы), где возможно образование микротрещин в системе водяного охлаждения стенок камеры. Этот метод основан на регистрации спектра излучения гидроксила ОН, неизбежно образующегося в вакуумной камере при натекании воды. Используется свечение гидроксила в области 306-320 нм (переход $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$). Метод позволяет оперативно обнаруживать натекание воды на уровне $3 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ с пространственным разрешением местоположения повреждений с точностью в несколько мм.

Возбуждение излучения гидроксила в камере с помощью тлеющего разряда в полном катоде. Регистрация излучения гидроксила в области спектра 300÷350 нм осуществляется через окно с возможностью наведения поля зрения спектрометра на выделенный участок внутренней стенки камеры (пространственное разрешение – несколько мм). Спектральный состав излучения анализируется спектрометром. На рис.1 показаны спектры излучения плазмы, зарегистрированные без натекания воды (слева) и с натеканием на уровне $3 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (справа). Виден значительный рост интенсивности свечения гидроксила в области 310 нм. На рис.2 показана динамика сигнала свечения гидроксила в лабораторной вакуумной установке при управляемом напуске паров воды (третья секунда шкалы). Видно, что сигнал о возникновении течи может быть зарегистрирован в течение двух-трех секунд.

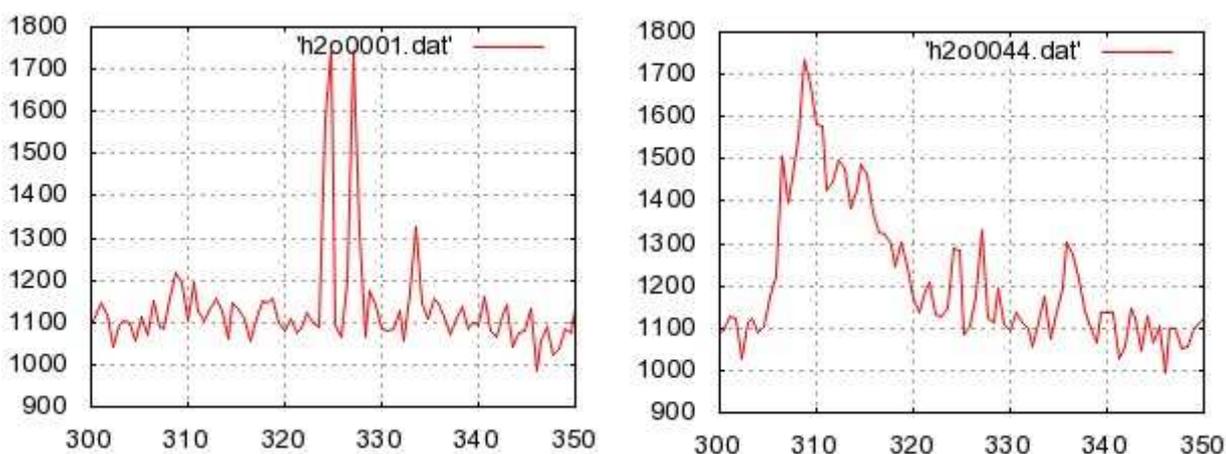


Рис.1. Спектры излучения плазмы, зарегистрированные без натекания воды (слева) и с натеканием на уровне $3 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (справа); по горизонтали – длины волн в нм.

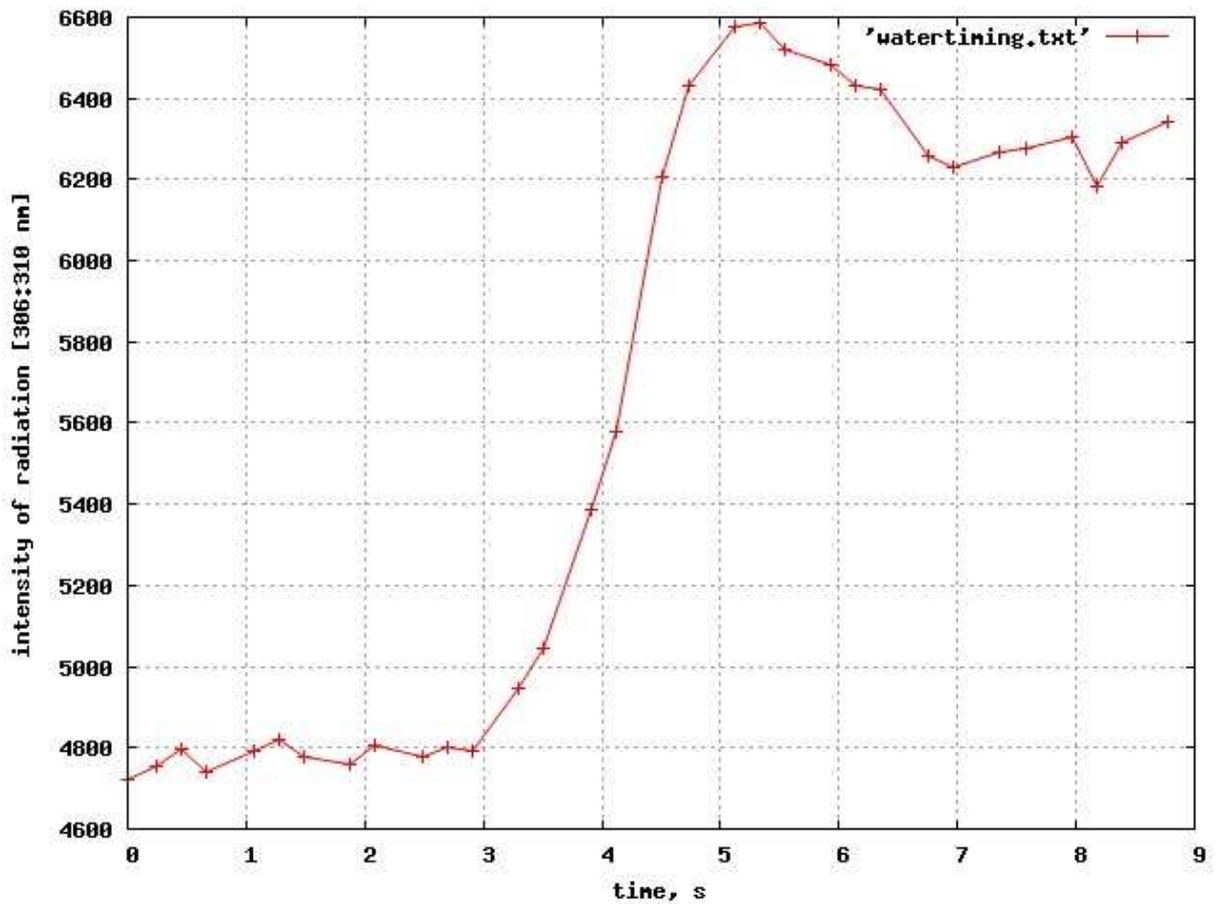


Рис.2. Зависимость интенсивности (0-0) полосы гидроксила 306-310 нм (переход $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$) от времени при напуске паров воды.

Таким образом, в нашей лабораторной установке зарегистрированы течи воды с порогом обнаружения $3 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

4. Новый метод регистрации спектров поглощения малых газовых примесей (Отдел оптики низкотемпературной плазмы)

Руководитель В.Н.Очкин

Исполнители: И.В.Николаев, М.В.Спиридонов, С.Н.Цхай

Разработан новый метод регистрации спектров поглощения малых газовых примесей во внешней многопроходной ячейке по фазовому сдвигу модулированного излучения диодного лазера.

Как известно, для измерения коэффициента поглощения слабо поглощающих веществ применяется методика регистрации фазового сдвига модуляции излучения, прошедшего через образец, помещенный в многопроходную оптическую систему резонаторного типа (*cavity attenuated phase shift* или *phase shift cavity ringdown spectroscopy*; R.Engeln et al. Chem. Phys. Letts., 262, 105 (1996); E.K.Lewis et al. Chem. Phys. Letts., 334, 357 (2001)). В таких схемах используют модулятор излучения, внешний по отношению к источнику света. В отличие от этих схем в предложенном методе не применяется внешний модулятор, а модуляция интенсивности излучения лазера осуществляется током инжекции. Поскольку в нашей схеме в качестве источника излучения используется диодный лазер, одновременно с модуляцией интенсивности в лазере происходит модуляция длины волны излучения. В результате первичные данные, получаемые с применением стандартной процедуры демодуляции, где определяется только фазовый сдвиг, представляют собой искаженный спектр поглощения. Для иллюстрации на рис.1 приведены данные о спектре поглощения воды в области 635 нм, полученные на нашей установке. Сверху представлены первичные данные о фазовом сдвиге. Для получения «истинного» спектра поглощения разработана математическая процедура с решением интегрального уравнения, позволяющая исключить роль модуляции длины волны. Необходимые при этом дополнительные данные о фазовом сдвиге на разных длинах волн излучения диодного лазера получают с применением специальной формы импульса тока накачки лазера, когда амплитуда модуляции медленно изменяется. В этом случае, в процессе демодуляции информация о фазовом спектре сохраняется в регистрируемом сигнале. Ее использование позволяет восстановить «истинный» спектр поглощения путем применения процедур регуляризации. Вид восстановленного спектра представлен на рис.1 (внизу).

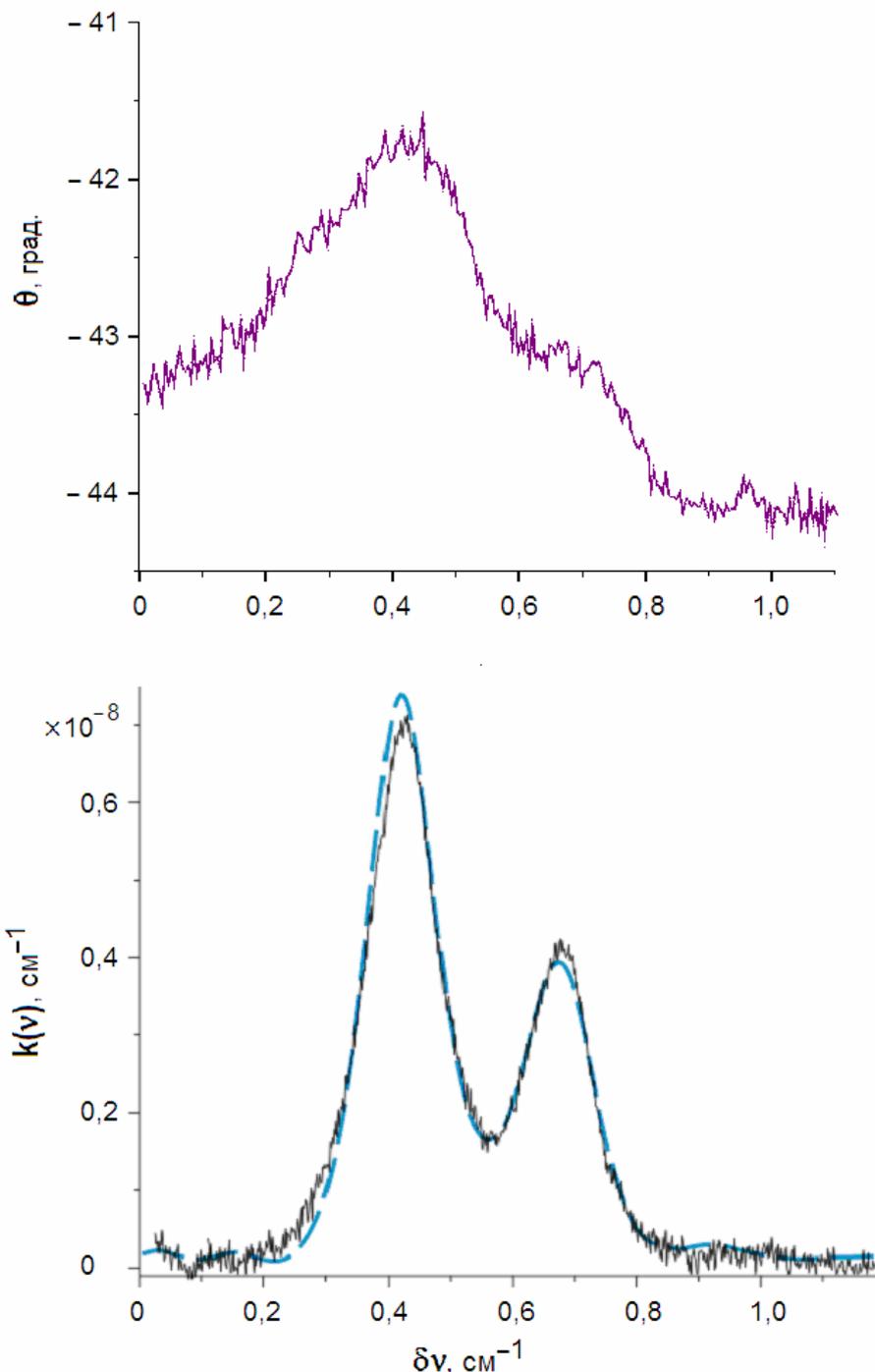


Рис.1. Спектр поглощения воды в области 635 нм. Вверху – первичные данные о фазовом сдвиге, получаемые при модуляции тока накачки диодного лазера на частоте 8,9 кГц. Внизу – восстановленный спектр, а также спектр, зарегистрированный по методу ICOS (штриховая линия).

Кроме того, на том же графике (рис.1, внизу) штриховой линией изображен спектр поглощения, зарегистрированный на той же установке при непрерывном изменении тока (без модуляции) по методу обычной интегральной спектроскопии (Integral Cavity Output Spectroscopy, ICOS). Видно, что первичные данные о фазовом сдвиге лишь грубо соответствуют спектру поглощения. В то же время имеет место хорошее совпадение

восстановленного спектра и спектра, зарегистрированного традиционным способом, где спектральное разрешение составляет $\sim 0,005 \text{ см}^{-1}$.

Прием изменения амплитуды модуляции с одновременным изменением глубины модуляции позволяет сохранять неизменной среднюю мощность, вкладываемую в лазерный диод при прохождении тока. Такой прием позволяет быстрее перестраивать длину волны лазерной генерации, т.к. не требуется время на отработку схемы температурной стабилизации лазера.

Анализ чувствительности использованного метода проводился с помощью дисперсии Алана результирующих данных. Ее зависимость от времени регистрации приведена на рис.2. Видно, что уровень шума при усреднении в предлагаемом методе (красная кривая) на порядок величины меньше, чем для интегрального метода записи спектра (синяя кривая). Минимальное значение измеренного поглощения при накоплении сигнала в течение 5 минут составило $\sim 7 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-1}$, что в ~ 50 раз лучше чувствительности, достигаемой в методе ICOS.

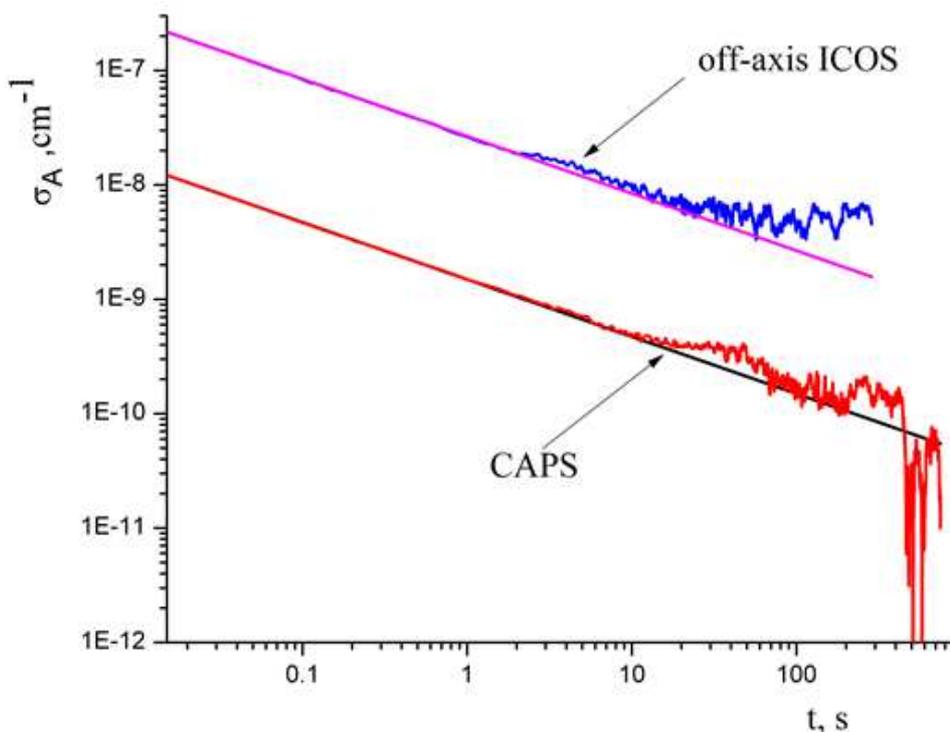


Рис.2. График дисперсии Алана данных о поглощении. Вверху (синяя линия) – данные в методе ICOS; внизу (красная линия) – данные предложенного метода.

5. Оптические свойства двухслойных и трехслойных металло-органических наночастиц и эффекты плазмон-экситонного взаимодействия (Оптический отдел и Отдел люминесценции)

Руководители: В.С.Лебедев, А.Г.Витухновский

Исполнители: А.С.Медведев, Д.А.Чубич

Экспериментально и теоретически исследовано влияние эффектов плазмон-экситонного взаимодействия на оптические свойства двухкомпонентных и трехкомпонентных наночастиц, состоящих из ядра металла (Ag, Au, Cu, Al), внешнего слоя J-агрегатов (ТС, ОС, РС) органического красителя и промежуточного пассивного диэлектрического слоя (ТМА) между ними. Рассчитаны частоты гибридных мод композитной системы, расщепленных в результате взаимодействия Френкелевского экситона в органической оболочке с дипольными и квадрупольными локализованными плазмонами в ядре наночастицы (рис.1).

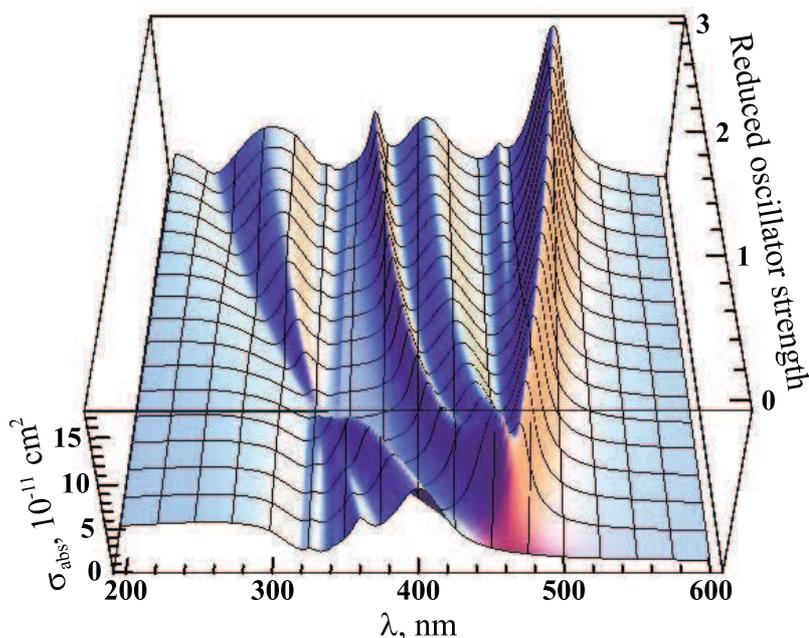


Рис.1. Сечения поглощения наночастиц Ag/J-агрегат в водном растворе в зависимости от длины световой волны в вакууме и приведенной силы осциллятора J-агрегата цианинового красителя. Радиус ядра $r_1=30$ нм; внешний радиус частицы: $r_2=33$ нм. Параметры лоренцевского контура молекулярного J-агрегата: собственная частота 2,68 эВ ($\lambda_0 = 462,6$ нм); ширина линии 0,066 эВ.

Полученные результаты демонстрируют качественно различный характер спектров фотопоглощения и рассеяния света изучаемыми частицами в зависимости от геометрических параметров системы и величины константы плазмон-экситонной связи, в том числе от значения приведенной силы осциллятора перехода в J-полосе красителя. На этой

основе выявлены и изучены режимы слабой и сильной плазмон-экситонной связи.

Для гибридных частиц с серебряным ядром установлено сильное влияние размерного эффекта на характер спектров фотопоглощения гибридной наночастицы в случае, когда ее размер становится значительно меньше, чем длина свободного пробега электрона в объемном металлическом образце (рис.2). Установлено, что для частиц с золотым ядром влияние этого эффекта на оптические свойства наночастиц оказывается существенно более слабым. Разработанная теория успешно объясняет полученные экспериментальные данные (В. I. Shapiro, E. S. Kol'tsova, A. G. Vitukhnovsky, D. A. Chubich, A. I. Tolmachev, and Yu. L. Slominskii, *Interaction between Gold Nanoparticle Plasmons and Aggregates of Polymethine Dyes: "Invisible" Nanoparticles*, *Nanotechnologies in Russia*, № 7-8, 456-462 (2011)) и позволяет надежно определить частоты гибридных мод системы и интенсивности спектральных пиков поглощения и рассеяния света. Показано, что при наличии промежуточного пассивного слоя между металлическим ядром и органической оболочкой в J-агрегатном состоянии характер плазмон-экситонной связи в системе существенно изменяется. Предложен эффективный способ управления явлениями плазмон-экситонного взаимодействия и спектральными характеристиками металлоорганических наноструктур.

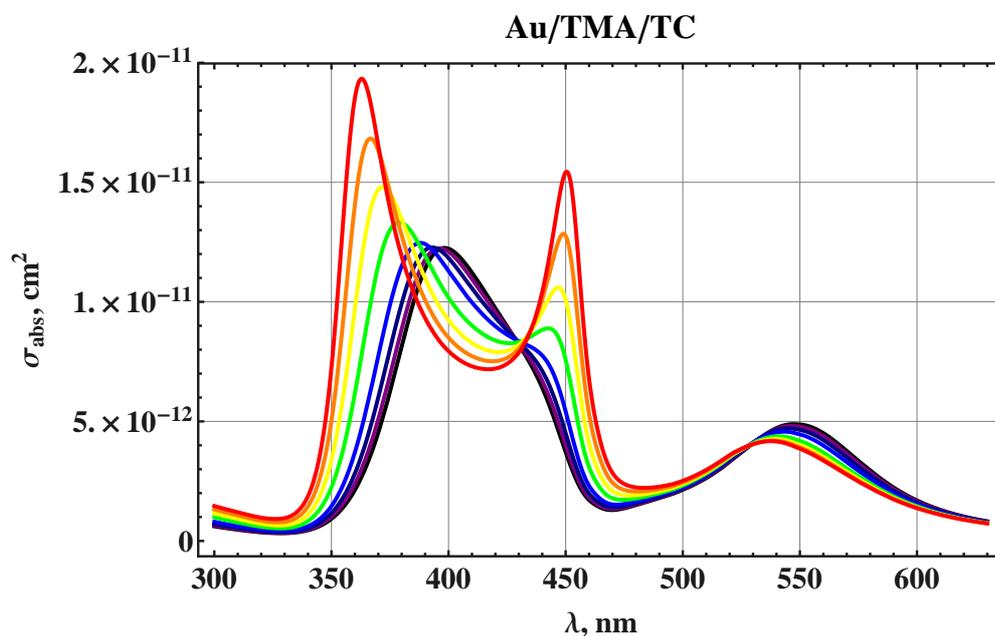


Рис. 2. Сечения поглощения света трехкомпонентными наночастицами (состоящими из золотого ядра, внешней J-агрегатной оболочки цианинового красителя ТС и пассивного диэлектрического слоя между ними (ТМА) в водном растворе в зависимости от длины волны в вакууме. Радиус ядра $r_1 = 10$ нм; толщина внешней оболочки $l = 3$ нм. Толщина промежуточного слоя варьируется в диапазоне от 0 нм (черная кривая) до 5 нм (красная кривая); для остальных кривых толщина оболочки составляет: 0,2 нм (фиолетовая кривая); 0,5 нм (синяя кривая), 1 нм (голубая кривая); 2 нм (зеленая кривая, 3 нм (желтая кривая); 4 нм (оранжевая кривая).