

## НАПРАВЛЕНИЕ 4. Планеты-гиганты, их спутники и кольца

Кураторы направления: Кусков О.Л. (ГЕОХИ), Торгашин Ю.М. (ИНАСАН),

Беспалов П.А. (ИПФ)

4.1	Проект 4.1: Исследование тонкой структуры спектров радиоизлучения Солнца и Юпитера как источника информации о физических процессах в солнечной короне и магнитосфере	ИПФ РАН	Шапошников В.Е.
4.2	Проект 4.2: Изучение динамики систем спутников планет-гигантов. Построение численных теорий движения основных спутников систем планет – гигантов и их использование для уточнения эфемерид Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна.	ИПА РАН	Питьева Е.В.
4.3	Проект 4.3: Роль примитивных каменно-ледяных тел в формировании вещества регулярных спутников Юпитера и Сатурна	ГЕОХИ РАН	Дорофеева В.А.
4.4	Проект 4.4: Исследование динамики спутников планет Солнечной системы по астрометрическим и фотометрическим наблюдениям.	ГАО РАН	Рощина Е.А.
4.5	Проект 4.5: Исследование кинетики основных и малых составляющих атмосфер планет земной группы, спутников планет Титана и Тритона. Исследование общей циркуляции атмосфер Венеры и Титана, а также радиационного нагрева и переноса аэрозолей в этих атмосферах.	ПГИ КНЦ РАН	Кириллов А.С., Мингалев И.В.

### Проект 4.1. Исследование тонкой структуры спектров радиоизлучения Солнца и Юпитера как источника информации о физических процессах в солнечной короне и магнитосфере

Разработана теория происхождения специфической тонкой структуры динамического спектра солнечного радиоизлучения в диапазоне частот 15-30 МГц, представляющей собой систему квазипериодических всплесков (“fingerprint”) повышенного излучения на фоне широкополосного излучения IV типа.

В рамках проекта обсуждается происхождение специфической тонкой структуры динамического спектра солнечного всплеска, наблюдавшейся на фоне континуума IV типа в диапазоне частот 14-30 МГц на радиотелескопе УТР-2 (Харьков, Украина). Динамический спектр обсуждаемого всплеска, представленный на рис.1, напоминает отпечаток пальца, поэтому авторы наблюдений [4] назвали его fingerprint.

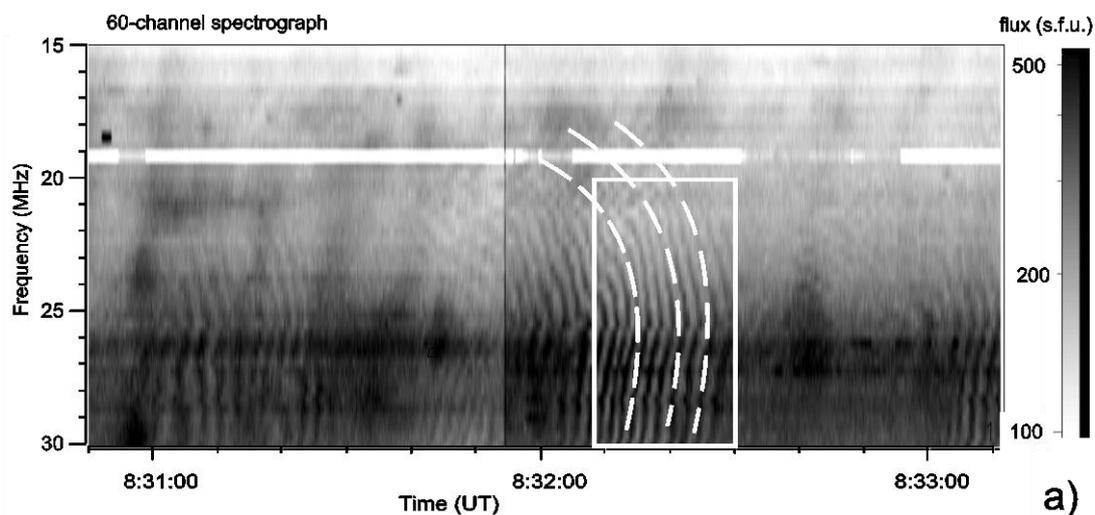


Рис. 1. Динамический спектр солнечного всплеска “fingerprint”, наблюдавшийся 22 июля 2004 года на радиотелескопе УТР-2 (Харьков, Украина).

Эта структура наблюдается на фоне широкополосного всплеска IV типа и состоит из параллельно дрейфующих узких полос повышенного (по сравнению с фоном) излучения и поглощения и отличается от широко известной зебра-структуры на метровых и дециметровых волнах тем, что в фиксированный момент времени частотный дрейф в пределах одной и той же полосы может иметь разный знак. В работе показано, что, как и обычная зебра-структура, “fingerprint” можно объяснить в рамках модели, основанной на эффекте двойного плазменного резонанса, и представляет собой типичную зебра-структуру.

Числовые оценки, проведенные в работе, показали, что данная модель может реализоваться в реальных условиях солнечной короны (при небольших отклонениях распределения электронной концентрации от типичного распределения типа модели Ньюкирка) и обеспечить наблюдаемые числовые значения частот зебра-полос и скорости частотного дрейфа.

**Руководитель проекта:** Шапошников Владимир Евгеньевич – доктор физ.-мат. наук, снс, Институт прикладной физики РАН, главный научный сотрудник, [sh130@appl.sci-nnov.ru](mailto:sh130@appl.sci-nnov.ru), (831) 416-48-81.

**Публикация:** по данному проекту в 2015 году опубликована 1 статья.

**Проект 4.2. Построение численных теорий движения основных спутников систем планет гигантов и их использование для уточнения эфемерид Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна.**

Построена предварительная версия численных теорий движения восьми классических спутников Сатурна (Мимас, Энцелад, Тетис, Диона, Рея, Титан, Гиперион, Япет) на интервале 1875-2020 гг. Уточнены теории движения всех планет и Луны (ЕРМ2014); показано влияние наблюдений на эфемериды планет, включая новые данные, в том числе, полученные в обсерватории Пулково.

**Руководитель проекта:** Питьева Елена Владимировна, доктор ф.-мат. наук, Институт прикладной астрономии РАН, [evpitjeva@gmail.com](mailto:evpitjeva@gmail.com).

**Публикации:** по данному проекту в 2015 году опубликовано 6 статей.

### **Проект 4.3. Роль примитивных каменно-ледяных тел в формировании вещества регулярных спутников Юпитера и Сатурна**

Обобщены экспериментальные данные по компонентному и изотопному составу комет различных динамических типов, а также проведено термодинамическое моделирование процесса образования водных плюмов Энцелада.

В 2015 г. в рамках проекта работа велась по двум основным направлениям.

**4.3.1. Обобщение экспериментальных данных по фазовому и изотопному составу вещества комет различных динамических типов с целью оценить возможный химический состав каменно-ледяного протовещества регулярных спутников Юпитера и Сатурна.**

Анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных по компонентному и изотопному составу комет различных динамических типов показал, что, основываясь на этих данных, можно говорить лишь о качественном составе ледяной компоненты протовещества регулярных спутников Юпитера и Сатурна. Для количественной оценки ее состава необходимы исследования состава ядер комет *insitu*.

**4.3.2. Построение термодинамической модели образования водных плюмов Энцелада.**

Энцелад – первое космическое тело, на котором впервые во внеземных условиях было открыто явление криовулканизма. Экспериментально определенный химический состав плюмов имеет ряд особенностей – в них одновременно присутствуют как окисленные ( $N_2$  и  $CO_2$ ), так и восстановленные формы ( $NH_3$  и  $CH_4$ ) азота и углерода [Waiteetal., 2009], натрий в форме  $NaCl$  и  $Na_2CO_3/NaHCO_3$  [Postbergetal., 2009], а также нано частицы  $SiO_2$  [Hsu, 2011]. Эти особенности указывают на то, что состав водных плюмов Энцелада

вероятнее всего образовался в результате химического взаимодействия в системе вода-порода, происходившем в его недрах. Это позволяет реконструировать условия образования водных плюмов Энцелада с помощью термодинамических моделей.

Моделирование образования водных плюмов Энцелада наблюдаемого состава проводилось в предположении, что он был обусловлен главным образом выбором исходного состава ледяной компоненты протовещества спутника. При ее плавлении в недрах Энцелада образуется водный раствор, взаимодействующий с пылевой компонентой в зависимости от глубины слоя при  $T = 90-10^{\circ}\text{C}$  и  $P = 190-20$  бар. Предполагалось, что такие газы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{NH}_3$  могли аккрецироваться в полном объеме, а  $\text{CO}$  и  $\text{N}_2$  либо вообще отсутствовали, либо присутствовали частично. Последнее соответствует гипотезе образования Энцелада на периферии протоспутникового диска, что возможно объясняет кардинальное различие изотопного состава водорода в молекуле  $\text{H}_2\text{O}$  плюмов Энцелада и в молекуле  $\text{CH}_4$  атмосферы Титана.

Полученные результаты вполне согласуются с наблюдаемым составом водных плюмов Энцелада

**Руководитель проекта:**

Дорофеева В.А., ГЕОХИ РАН, e-mail: [dorofeeva@geokhi.ru](mailto:dorofeeva@geokhi.ru)

**Публикации:** по данному проекту в 2015 году опубликовано 3 статьи.

**4.3.3. Термодинамические свойства, фазовые переходы льдов  $\text{H}_2\text{O}$  и химическая дифференциация ледяных спутников Юпитера и Сатурна.**

На основе измеренных значений момента инерции построены модели частично дифференцированного Титана, включающие внешнюю водно-ледяную оболочку мощностью 450-470 км, промежуточную каменно-ледяную мантию и внутреннее железокаменное ядро с радиусом 1300-1350 км.

**Руководитель проекта:** Кусков О.Л., [ol\\_kuskov@mail.ru](mailto:ol_kuskov@mail.ru), [kuskov@geokhi.ru](mailto:kuskov@geokhi.ru) (ГЕОХИ РАН).

**Публикации:** по данному проекту в 2015 году опубликована 1 статья и 2 доклада.

**Проект 4.4. Исследование динамики спутников планет Солнечной системы по астрометрическим и фотометрическим наблюдениям.**

В рамках проекта были выполнены позиционные наблюдения спутников Урана и Юпитера, фотометрические наблюдения взаимных явлений в системе галилеевых

спутников Юпитера (получено 27 кривых блеска) и новая астрометрическая редукция старых фотографических наблюдений Сатурна и его спутников.

Наблюдения планет и их естественных спутников дают материал, необходимый для построения и уточнения теорий движения небесных тел. В свою очередь, совершенствование теорий важно для не только для согласования звездной и динамической систем координат, но и для обеспечения космических миссий более точными эфемеридами. Для построения теории движения планет и спутников используется весь накопленный ряд положений, и чем ряд длиннее, тем точнее будет модель движения. Поэтому в проекте отводится место как продолжению астрометрических наблюдений планет и их спутников, так и более точному переизмерению старых астронегативов и определению координат тел Солнечной системы в современной системе координат с новейшими каталогами. Телескопы Пулковской обсерватории, оснащенные ПЗС-камерами, позволяют получать экваториальные координаты спутников планет с точностью на уровне 5-100 mas.

В 2015 г. по проекту были выполнены следующие работы:

#### **Тема 4.4.1. ПЗС-наблюдения спутников планет-гигантов.**

**Получено более 11000 кадров для Юпитера, Урана и их спутников.**

#### **Тема 4.4.2. В 2015 г. обработаны наблюдения спутников планет-гигантов, произведено сравнение с теорией и выполнена оценка точности.**

В рамках работ по проекту по наблюдениям на 26-дюймовом рефракторе, Нормальном Астрографе и 1-м зеркальном телескопе «Сатурн» были определены экваториальные координаты галилеевых спутников Юпитера, далеких спутников Юпитера и четырех спутников Урана. Точности позиционных наблюдений составили 0.005-0.065 arcsec для 26-дюймового рефрактора, 0.020-0.080 arcsec для Нормального Астрографа и 0.080-0.100 arcsec для телескопа «Сатурн». Полученные положения были сравнены с новейшими теориями движения по дисперсии разностей «О-С» сделана оценка точности наблюдений. Фотометрические наблюдения взаимных явлений – затмений или покрытий спутников являются очень важными для получения материала для уточнения теорий движения. Результаты анализа кривых блеска спутников, полученные во время взаимных явлений, позволяют получить особо точные астрометрические данные. Взаимные явления в системе галилеевых спутников Юпитера повторяются с периодом в 6 лет и 9 месяцев. В

2014-2015 гг. явления были доступны для наблюдений в Пулковке с октября 2014 г. по август 2015 г. Высота Юпитера над горизонтом достигала 45 градусов в меридиане.

По фотометрическим наблюдениям взаимных явлений в системе галилеевых спутников Юпитера на 26-дюймовом рефракторе получено 27 кривых блеска. Среднеквадратичные ошибки одного определения блеска составили от 0.02m до 0.19m, в среднем – 0.06m. Также определялся момент максимального падения блеска. Ошибки определения момента максимума зависели от глубины явления и количества полученных кадров, составили от 0.2 сек. до 11.9 сек., в среднем – 4 сек. По результатам обработки ПЗС-кадров и построению кривых блеска предполагается определить взаимные расстояния между спутниками и оценить рассогласования с теорией.

#### **Тема 4.4.3. В 2015 г. выполнялась оцифровка и редукция фотографических наблюдений Сатурна в современной системе координат.**

Выполнена новая редукция фотографических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе и Нормальном астрографе в 1972-74 гг. главных спутников Сатурна с современными опорными каталогами Tycho2, UCAC2. Фотопластинки были оцифрованы с применением новой разработанной в Пулковке методики с использованием цифровой камеры. Анализ полученных результатов показал *в три раза более высокую внутреннюю точность* по сравнению с результатами старой редукции по измерениям на Аскорекорде. Новые результаты по старым фотографическим наблюдениям приблизились по точности к современным ПЗС-наблюдениям.

**Руководитель проекта:**Рощина Е.А., к.ф.-м.н., [star-fox@yandex.ru](mailto:star-fox@yandex.ru), ГАО РАН.

**Публикации:**по данному проекту в 2015 году опубликовано 9 статей.

#### **Проект 4.5. Исследования общей циркуляции атмосфер Венеры и Титана, радиационных и кинетических процессов в атмосферах планет земной группы, Титана и Тритона. Исследование общей циркуляции атмосфер Венеры и Титана, а также радиационного нагрева и переноса аэрозолей в этих атмосферах**

Впервые в мировой практике исследованы особенности релаксации энергии метастабильного молекулярного азота (основной составляющей планет Земли, Титана, Тритона), образующегося в верхних атмосферах планет при поглощении солнечных фотонов, фотоэлектронов, магнитосферных высокоэнергичных частиц.

**Тема 4.5.1.** Начаты исследования по взаимодействию метастабильных молекул с невозбужденными молекулами. Собран банк данных по скоростям взаимодействия метастабильного молекулярного азота с газами атмосфер Солнечной системы ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  и т.п.), основанный на рассчитанных в ПГИ константах и имеющихся в научной литературе экспериментальных данных для моделирования кинетики азота в смеси газов. Определены основные механизмы релаксации энергии метастабильного азота при неупругих столкновениях с различными молекулами.

**Тема 4.5.2.** Проведено исследование воздействия облачности на вертикальное распределение озона на арх. Шпицберген (Нью-Олесунн). Показано, что, несмотря на химическое взаимодействие озона с водным аэрозолем облаков, его вариации зависят, главным образом, от динамических процессов вне и внутри облака (стратификации, наличия или отсутствия инверсий, адвекции, вертикальных движений воздуха).

**Руководитель проекта:** и.о.зав.лаб. Полярного геофизического института, д.ф.-м.н. Кириллов А.С., kirillov@pgia.ru

**Публикации:** по данному проекту в 2015 году опубликована 1 статья.

**Доклады:** 1 устный и 1 стендовый доклад.