

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

Аннотация. 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.

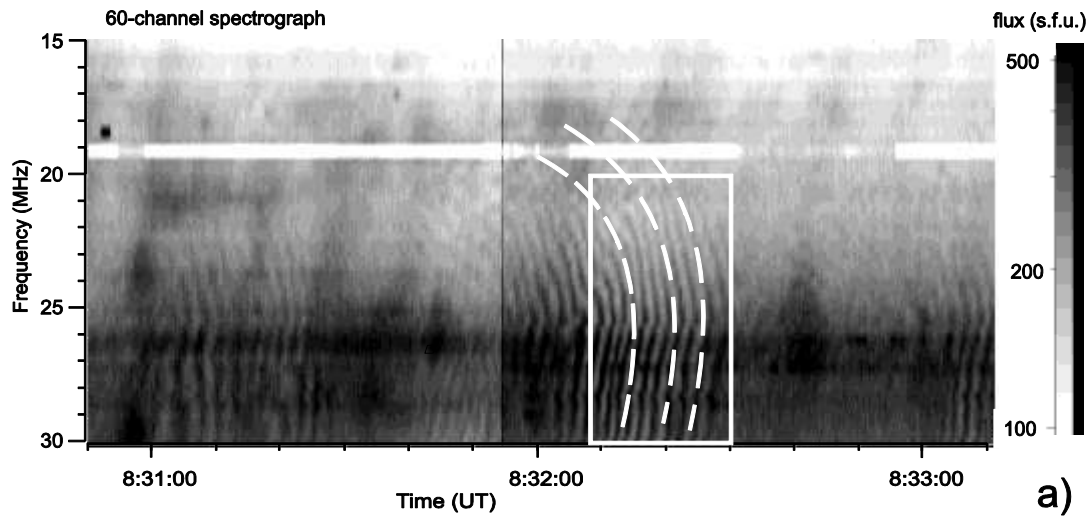


Рис. 1. Динамический спектр солнечного всплеска “fingerprint”, наблюдавшийся 22 июля 2004 года на радиотелескопе УТР-2 (Харьков, Украина).

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.

Модель происхождения зебра-структуры, основанная на эффекте двойного плазменного резонанса, предполагает, что в магнитной силовой трубке в некотором интервале высот наряду с равновесной слабоанизотропной корональной плазмой с концентрацией N имеется небольшое количество электронов с концентрацией N_e , $N_e \ll N$, неравновесных по поперечным относительно магнитного поля скоростям.

Тогда на фиксированных уровнях, определяемых тем, что на них частота верхнего

гибридного резонанса $f_{UH} = \sqrt{f_B^2 + f_p^2} \approx f_p$ (последнее приближенное равенство

справедливо при условии слабой анизотропии $f_B \ll f_p$) совпадает с гармониками

электронной гирочастоты f_B , т.е. $f_p = s f_B$, имеет место повышенная генерация плазменных волн, распространяющихся перпендикулярно магнитному полю. В

приведенных выше соотношениях $f_p = (e^2 N / \pi m)^{1/2}$ – плазменная частота, $f_B = eB / 2\pi mc$

– электронная гирочастота, B – магнитное поле, e и m – заряд и масса электрона, c – скорость света, s – номер гармоники.

Неотъемлемой частью плазменного механизма генерации радиоизлучения является трансформация плазменных волн, не выходящих за пределы короны, в электромагнитное излучение, свободно покидающее ее пределы [2]. Есть все основания полагать [3], что в источниках зебра-полос преобладает процесс индуцированного рассеяния плазменных волн на ионах или низкочастотных колебаниях. В этом случае преобразование плазменных волн происходит без существенного изменения частоты, т.е. с сохранением «полосатого» характера спектра.

В модели, основанной на эффекте двойного плазменного резонанса изменение частоты зебра-полосы определяется относительным изменением магнитного поля и концентрации

плазмы и существенно зависит от соотношения величин $L_N = f_p (df_p/dl)^{-1}$ и $L_B = f_B (df_B/dl)^{-1}$ – характерных размеров неоднородности электронной концентрации и магнитного поля в источнике. Если в источнике с $L_N > L_B$ магнитное поле в источнике уменьшается со временем (что довольно естественно для послевспышечной фазы), тогда наблюдается положительный частотный дрейф. Напротив, в источнике с более быстрым изменением электронной концентрации с высотой, $L_N < L_B$, частотный дрейф будет отрицательным при уменьшении магнитного поля. Частота полос зебра-структуры может меняться и при постоянном магнитном поле вследствие увеличения или уменьшения электронной концентрации плазмы. Независимо от соотношения между изменением электронной концентрации и магнитного поля, частотный дрейф будет положительным при увеличении концентрации и отрицательным при ее уменьшении.

Предположим, что электронная концентрация меняется с высотой таким образом, что ее градиент меняется в широких пределах от довольно значительных величин на больших высотах до существенно меньших значений на меньших высотах. Предполагаемая качественная зависимость плазменной частоты от высоты (совпадающая с распределением электронной концентрации в ловушке) представлена на рис. 2 (пунктирные кривые). Для простоты мы считаем, что градиенты электронной концентрации и магнитного поля расположены вертикально в короне и рассматриваем зависимость только от высоты h .

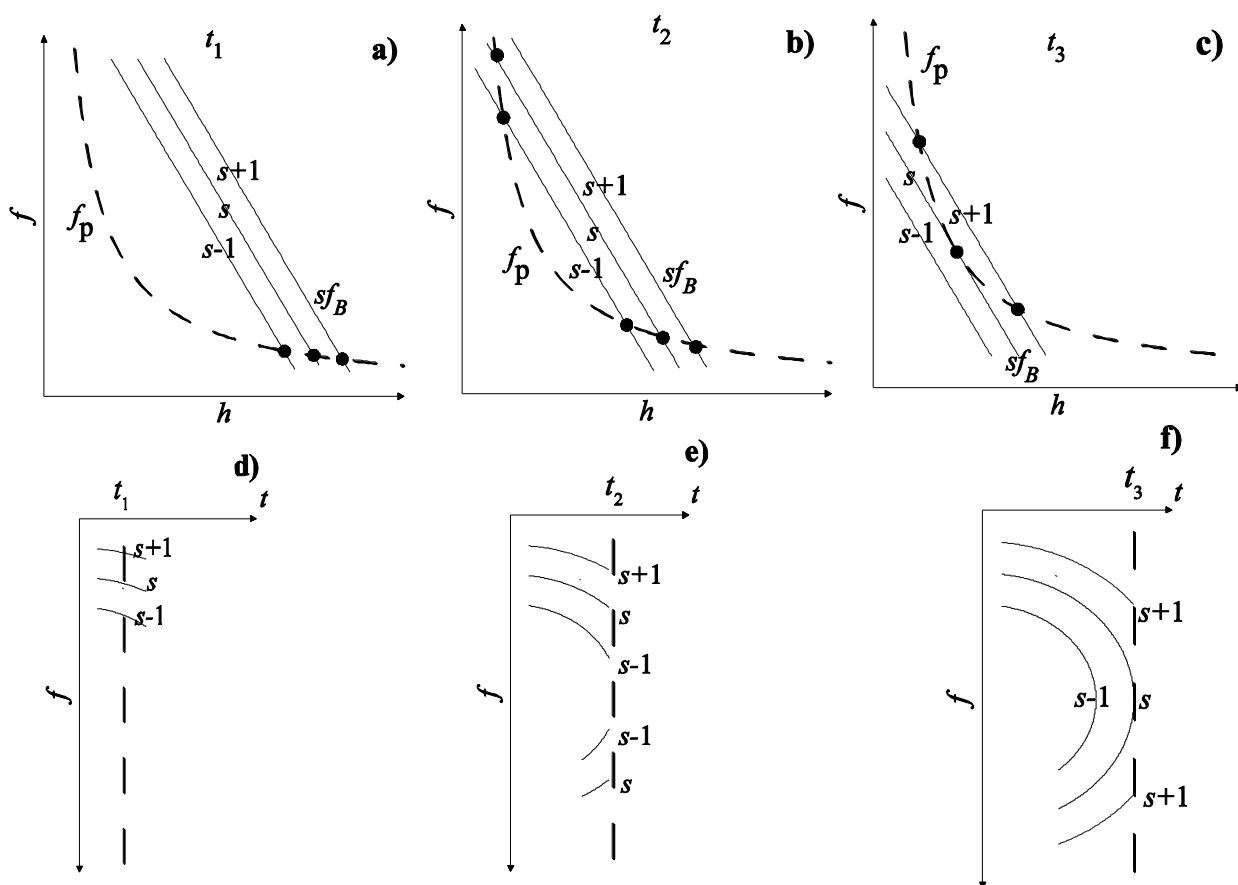


Рис. 2. Качественная интерпретация “fingerprint” структуры как системы квази-вертикальных арок.

Допустим, что в какой-то момент времени t_1 излучающие гармоники (пусть их будет три с номерами $s-1$, s и $s+1$) пересекают это распределение концентрации только в низкочастотной части (рис. 2а). Тогда на динамическом спектре радиоизлучения (рис. 2б) появятся три точки ДПР. При уменьшении магнитного поля, т.е. при движении трех кривых, отображающих гармоники, вниз на рис. 2а, точки ДПР будут перемещаться в сторону более высоких частот, и, таким образом, здесь формируются обычные зебра-полосы со слабым положительным частотным дрейфом (как следует из рис. 2а, здесь $L_N > L_B$). При дальнейшем уменьшении магнитного поля и перемещении точек ДПР в сторону более высоких частот градиент концентрации увеличивается, и скорость частотного дрейфа возрастает (рис. 2д). Самое важное свойство модели состоит в том, что при дальнейшем уменьшении магнитного поля и смещении гармоник вниз по частоте они начинают пересекать кривую концентрации $f_p(h)$ в двух точках – см. момент t_2 (рис. 2б). Таким образом, в рамках одной гармоники на динамическом спектре есть уже две точки,

определяющие зебра-полосу. Кроме того, в высокочастотной части зебра-полосы соотношение между градиентами обратно тому, которое имеет место в низкочастотной части спектра, т.е. $L_N < L_B$. Это означает, что при уменьшении магнитного поля частоты ДПР будут уменьшаться, обеспечивая отрицательный частотный дрейф. На динамическом спектре две ветви гармоник будут, таким образом, сближаться (рис. 2е). Очевидно, что при дальнейшем уменьшении магнитного поля (рис. 2с, момент t_3) частотное расстояние между точками ДПР еще больше уменьшается, точки сближаются, а затем данная гармоника уходит из области пересечения с кривой зависимости концентрации от высоты, т.е. не имеет точек ДПР (рис. 2с) и исчезает с динамического спектра (рис. 2ф).

В тот момент времени, который соответствует касанию кривых $f_p(h)$ и $s f_B(h)$, скорость частотного дрейфа становится бесконечной. Именно так и ведут себя полосы на наблюдаемом динамическом спектре в период времени после середины «дуги». Кажущийся вертикальным характер полос объясняется довольно близкими значениями градиентов магнитного поля и концентрации. Аналогично можно интерпретировать поведение зебра-полос в период времени, предшествующий середине «дуги»: магнитное поле увеличивается со временем, гармоники $s f_B$ передвигаются вверх, и развитие сценария идет по рис. 2 от f к a . Начало события, по-видимому, определяется тем моментом времени, когда сформировалась функция распределения неравновесных электронов, необходимая для реализации эффекта ДПР. Величина магнитного поля в этот момент времени определяет номер наибольшей гармоники, участвующей в событии.

Таким образом, петлеобразная структура зебра-полос в событии “fingerprint” объясняется постепенным нарастанием и спаданием величины магнитного поля в источнике с электронами, неравновесными по поперечным относительно магнитного поля скоростям, при условии, что гармонике с заданным номером s соответствуют две точки ДПР на разных высотах. При этом номер гармоники растет от более «внешних» к более «внутренним» дугам.

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. Источник располагается на высоте $h \sim (5-10)$ сотен тыс. км над

фотосферой, электронная концентрация меняется в пределах $N \sim (0.3 - 1.1) \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$, магнитное поле составляет $B \sim (0.3 - 0.5) \text{ Гс}$.

Указанный интервал высот определяется границами ловушки, в которых существуют захваченные магнитным полем электроны, неравновесные по поперечным относительно магнитного поля скоростям. Время существования всплеска также определяется временем жизни неравновесных электронов в ловушке. Согласно представленной интерпретации, электроны впрыскиваются в ловушку (со специфическим распределением электронной концентрации по высоте) примерно в 08:31:20. В этот момент магнитное поле достаточно мало, чтобы двойной резонанс с плазменной частотой осуществлялся только на гармониках с номерами около $s \sim 30$. Затем магнитное поле начинает увеличиваться, точки ДПР на высокочастотном и низкочастотном крыльях зебра-полосы смещаются в сторону высоких и низких частот соответственно, а также в резонанс попадают гармоники со все меньшими номерами. Затем магнитное поле достигает своего максимума около 08:32:00, где зебра-полосы расположены квазигоризонтально, что соответствует рис. 3а. После этого магнитное поле начинает уменьшаться, что приводит к появлению на динамическом спектре быстро дрейфующих зебра-полос с противоположной «выпуклостью» (рис. 2b-с). Окончание всплеска в 08:32:28 связано с исчезновением неравновесных электронов из источника.

Отметим, что изменение магнитного поля происходит одновременно по всей высоте источника, т.е. в интервале $h \sim 5\text{-}10$ сотен тыс. км, соответствующем наблюдаемому интервалу наблюдаемых частот $f \sim 5\text{-}10$ МГц. При этом не исключено, что в сторону меньших высот источник простирается ниже указанных высот: низкочастотная граница источника наблюдается на спектре, в то время как высокочастотная граница, возможно, отрезана границами доступного диапазона измерений. Одновременное изменение магнитного поля свидетельствует о том, что наблюдаемые зебра-полосы в виде петли не могут быть связаны с возмущениями, распространяющимися вдоль петли в короне, а обусловлены, вероятнее всего, неким самосогласованным процессом, охватывающим всю петлю. Наиболее вероятным кандидатом такого процесса является нелинейное БМЗ-колебание магнитной трубки, при котором происходит сжатие и разрежение неоднородного по высоте магнитного поля трубки. Такое представление подтверждается числовыми оценками.

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

Состав группы:

Зайцев Валерий Васильевич – доктор физ.-мат. наук, профессор, Институт прикладной физики РАН, главный научный сотрудник, za130@appl.sci-nnov.ru, (831) 416-06-59;

Злотник Елена Яковлевна – доктор физ.-мат. наук, снс, Институт прикладной физики РАН, ведущий научный сотрудник, zlot@appl.sci-nnov.ru, (831) 416-06-59.

Литература

1. V.N. Melnik, H.O. Rucker, A.A. Konovalenko, V.V. Dorovskyy, E.P. Abranin, A.I. Brazhenko, B.Thide, A. A. Stanislavskyy Solar Type IV bursts at frequencies 10-30 MHz. Solar Physics Research Trends (ed. Pingzhi Wang) Nova Science Publishers, New York, 2008, pp. 287-325.
2. Zheleznyakov, V.V.: 2000, *Radiation in Astrophysical Plasmas*, Kluwer Acad. Publ, Dordrecht.
3. Zlotnik, E. Y.; Zaitsev, V. V.; Altyntsev, A. T.: On Polarization of the Zebra Pattern in Solar Radio Emission 2014, *Solar Phys.* 289, 233.

Публикация:

E.Y. Zlotnik, V.V. Zaitsev, V.N. Melnik, A.A. Konovalenko, V.V. Dorovskyy. “Fingerprint” fine structure in the solar decametric radio spectrum // *Solar Physics*, 2015. 290, 2013-2030,

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

Аннотация. Построена предварительная версия численных теорий движения восьми классических спутников Сатурна (Мимас, Энцелад, Тефия, 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.

Построена предварительная версия численных теорий восьми классических спутников Сатурна (Мимас, Энцелад, Тефия, Диона, Рея, Титан, Гиперион, Япет) на интервале 1875-2020 гг. (значительно большем, чем ранее). Построенные теории представлены в виде полиномов Чебышева. Было выполнено совместное интегрирование уравнений движения этих спутников с учетом их взаимных возмущений, а также возмущений от Солнца, планет и потенциалов центральных планет. К элементам орбит спутников получены поправки по 31521 астрометрическому наблюдению разного типа, выполненным в 1875-2011 гг. В результате улучшения получены поправки к значениям координат и скоростей спутников. Среднеквадратичные ошибки представления наблюдений по прямому восхождению и склонению составили $0.1'' - 2.00''$. Все использованные наблюдения спутников Сатурна и их остаточные невязки (RMS) даны в таблице 1, и показаны на рисунках 1 и 2, как пример, для Энцелада и Титана.

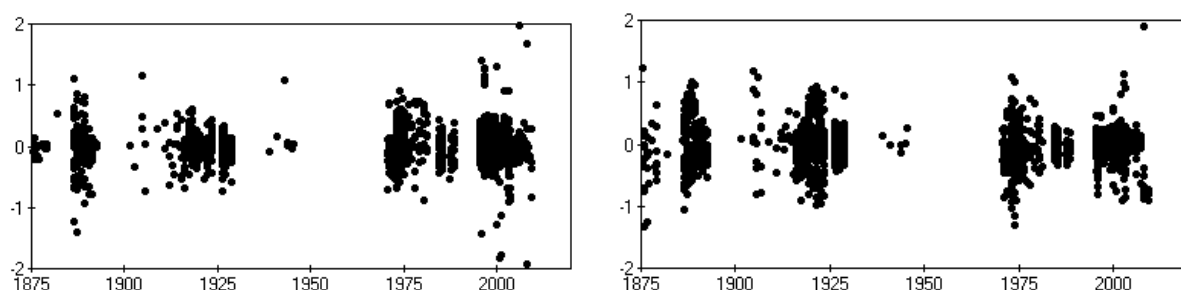


Рис. 1. Остаточные невязки по прямому восхождению и склонению для Энцелада в $''$.

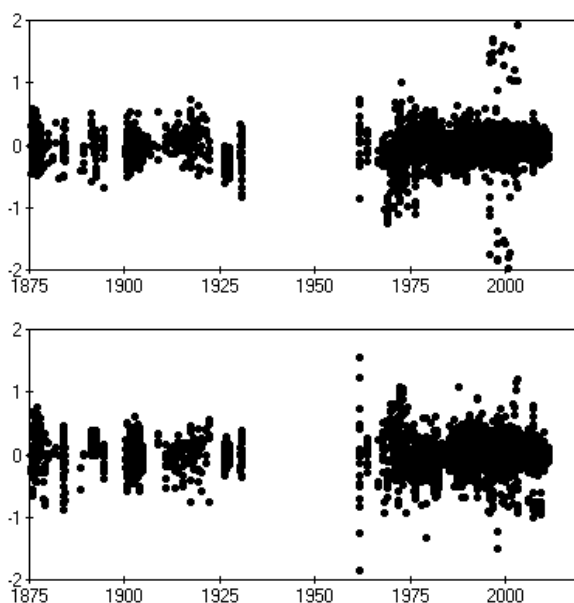
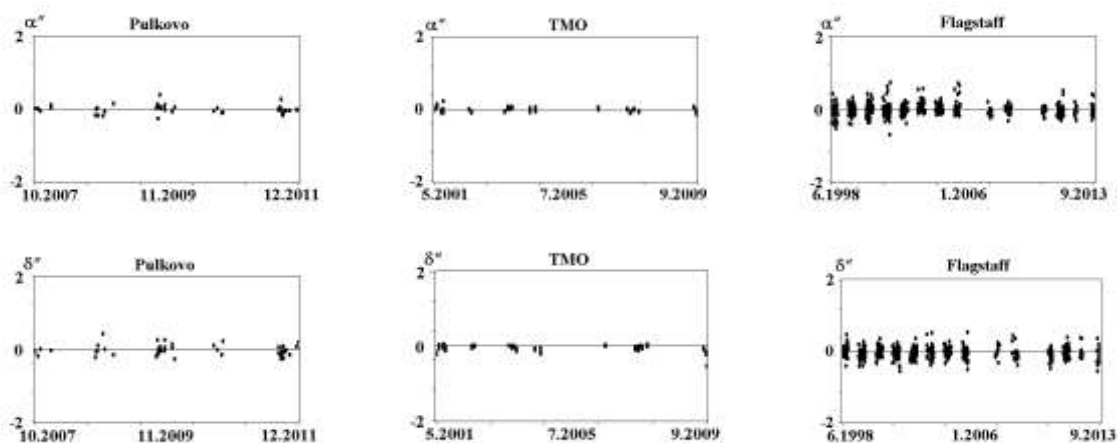


Рис. 2. Остаточные невязки по прямому восхождению и склонению для Титана в $''$.

Таблица 1. Наблюдения, использованные для создания новой версии теорий движения восьми спутников Сатурна и их RMS.

Спутник	Интервал	Кол-во наблюдений	RMS для различных типов наблюдений					
			Позиционные		Дифференциальные			
			$\square\square\cos$	$\square\square$	Планета – спутник		спутник – спутник	
			$\square$ arcs	Arcs	$\square\square\cos\square$ arcs	$\square\square$ arcs	$\square\square\cos\square$ arcs	$\square\square$ arcs
Мимас	1875-2011	1527	0.8-3.5	0.3-1.0	0.4-0.8	0.3-0.7	0.7-1.0	0.1-0.7
Энцелад	1875-2011	3306	0.3-1.8	0.4-1.3	0.2-0.3	0.1-0.5	0.1-0.2	0.1-0.2
Тефия	1875-2011	6204	0.3-1.5	0.2-0.6	0.4-1.0	0.1-0.5	0.1-0.4	0.1-0.4
Диона	1875-2011	5672	0.1-0.7	0.1-0.6	0.1-0.3	0.1-0.5	0.1-0.2	0.1-0.2
Рея	1875-2011	3035	0.1-0.8	0.1-0.5	0.1-1.5	0.1-0.5	0.1-0.2	0.1-0.2
Титан	1875-2011	5577	0.1-0.4	0.1-0.5	0.1-0.3	0.1-0.5	0.1-0.3	0.1-0.2
Гиперион	1875-2011	1734	1.3-1.8	0.4-0.8	1.8-2.0	0.8-1.0	1.0-2.0	0.3-0.7
Япет	1875-2011	4466	0.1-0.5	0.1-0.5	0.1-0.3	0.2-1.0	0.1-0.4	0.1-0.2

Продолжалась работа по расширению базы данных всех внешних планет и их спутников. Были включены в обработку и улучшение версии численной теории планет и Луны ИПА РАН — EPM2014 новые позиционные наблюдения, полученные на обсерваториях Flagstaff, Table Mountain, Пулково. Из сравнения RMS наблюдений было показано, что точность Пулковских наблюдений спутников Урана выше, чем точность наблюдений этих же объектов, полученная во Flagstaff (см. рис. 3), хотя погодные условия в обсерватории Flagstaff значительно лучше.



$$\begin{array}{lll}
 v_{\alpha \cos \delta} = -0.016'', \sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.117''} & v_{\alpha \cos \delta} = -0.014'', \sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.068''} & v_{\alpha \cos \delta} = -0.035'', \sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.142''} \\
 v_{\delta} = -0.047'', \sigma_{\delta} = \underline{0.146''} & v_{\delta} = -0.060'', \sigma_{\delta} = \underline{0.086''} & v_{\delta} = -0.053'', \sigma_{\delta} = \underline{0.159''}
 \end{array}$$

Рис. 3. Сравнение О-С наблюдений Titania, третьего спутника Урана, выполненные на трех обсерваториях в Пулково (46) 2007-2011 гг., ТМО (87) 2001-2009 гг. и в Flagstaff (485) 1998 –2013 гг.

Было показано влияние количества, качества и интервала наблюдений на точность построенных эфемерид. В таблице 2 показаны формальные стандартные ошибки (σ) орбитальных элементов внешних планет для разных наборов наблюдений, где a — большая полуось, i — наклон орбиты, Ω — долгота восходящего узла, e — эксцентриситет, λ — средняя долгота. В первой колонке “О” означает использование для улучшения планетных орбит только оптических наблюдений, “+ сп.” — использование в дополнение к наблюдениям самих планет, позиционных наблюдений их спутников, а “+ радио” — использование также всех доступных радиотехнических наблюдений рассматриваемых планет. Из таблицы видно, что использование наблюдений спутников Юпитера и Сатурна уменьшает формальные ошибки всех орбитальных элементов в несколько раз, так как для улучшения этих планет не могли быть использованы фотографические и ПЗС наблюдения самих планет из-за их огромной яркости по сравнению со звездами сравнения, а наблюдения спутников успешно используются. Кроме того, видно улучшение точности при использовании радиотехнических данных КА, находящихся или проходивших около планет. Точность орбитальных элементов Сатурна увеличилась более чем на порядок, а для a , $e \cos \pi$ и $e \sin \pi$ на три порядка благодаря 10-летнему ряду времен запаздывания КА Cassini.

Таблица 2. Формальные стандартные ошибки (σ) орбитальных элементов внешних планет для разных наборов наблюдений.

Планета	a [км]	$\sin i \cdot \cos \Omega$ [mas]	$\sin i \cdot \sin \Omega$ [mas]	$e \cdot \cos \pi$ [mas]	$e \cdot \sin \pi$ [mas]	Λ [mas]
Юпитер-О	1.693	10.912	10.854	6.188	5.497	11.43
О	0.588	2.268	2.314	1.258	1.197	1
+ сп. 1 - 4	0.347	2.005	1.808	0.128	0.109	2.361
+ радио						0.882
КА						
Сатурн-О	10.823	14.795	14.584	8.136	7.440	18.45
+ сп. 1–9	3.437	1.731	2.333	1.428	1.310	2
+ радио	0.0048	0.0807	0.057	0.001	0.0004	3.376
КА						0.012
Уран-О	33.779	4.321	4.256	3.795	3.666	5.993
+ сп. 1–4	32.554	3.960	3.138	3.198	3.630	5.643
+ радио	30.033	3.453	3.007	2.849	2.003	3.592
КА						
Нептун-О	314.46	4.253	5.718	7.025	14.747	13.65
+ сп. 1–4	2	4.082	4.918	5.983	13.800	0
+ радио	288.69	2.669	5.195	5.546	13.540	12.06
КА	9					1
	270.47					12.34
	0					5

Теории для спутников Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна используются для вычисления эфемерид этих спутников, которые доступны на сайте ИПА РАН <http://www.ipa.nw.ru/PAGE/rusipa.htm>

На основе построенных теорий движения спутников по позиционным наблюдениям этих спутников (а также оптических и радиотехнических измерений планет и космических аппаратов) были и уточнены эфемериды внешних планет.

Руководитель проекта: Питьева Елена Владимировна, доктор ф.-мат. наук, Институт прикладной астрономии РАН, evpitjeva@gmail.com.

Состав группы: Космодамианский Г.А., Павлов Д.А., Порошина А.Л.

Публикации:

1. *Питьева Е. В., Павлов Д. А., Скрипниченко В. И.* Повышение точности фундаментальные эфемерид планет (EPM) // Шестая Всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение" (КВНО-2014), Санкт-Петербург, 20-24 апреля 2015 г. (тезисы докладов) - С. 88.
2. *Питьева Е. В.* Астрометрические наблюдения для построения планетных эфемерид Всероссийская астрометрическая конференция "Пулково - 2015", Санкт-Петербург, ГАО РАН, 21-25 сентября 2015 г. (тезисы докладов), - С. 36.
3. *Питьева Е. В., Павлов Д. А., Скрипниченко В. И.* Повышение точности фундаментальные эфемерид планет (EPM) // Труды ИПА РАН. - СПб.: Наука, 2015. - Вып. 35. - С. 1–6 (в печати).
4. *Pitjeva E.* Evolution of ephemerides EPM of IAA RAS // Proceedings of of Journees - 2014 "Systèmes de référence spatio-temporels", Z. Malkin, N. Capitaine (eds.), St. Petersburg, 2015.– P. 92–95.
5. *Pitjeva E. V., Pavlov D. A., Pitjev N. P.* Dynamical models of the Solar system and accuracy of planetary ephemerides // SPACEKAZAN-IAPS-2015 / ed.: M. Ya. Marov – Kazan: Publishing house of Kazan University, 2015.– P. 130–133.
6. *Pitjeva E. V.* EPM - High-Precision Planetary Ephemerides of IAA RAS for Scientific Research and Astronavigation on the Earth and in Space // Highlights of Astronomy - 2015. – V. 16. - P. 221–222.

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

Аннотация. Обобщены экспериментальные данные по компонентному и изотопному составу ком 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.

В настоящее время в литературе имеются данные по экспериментально определенному составу ком восьми короткопериодических комет и кометы Галя (HTC) (они представлены на рис. 1), а также пяти долгопериодических комет.

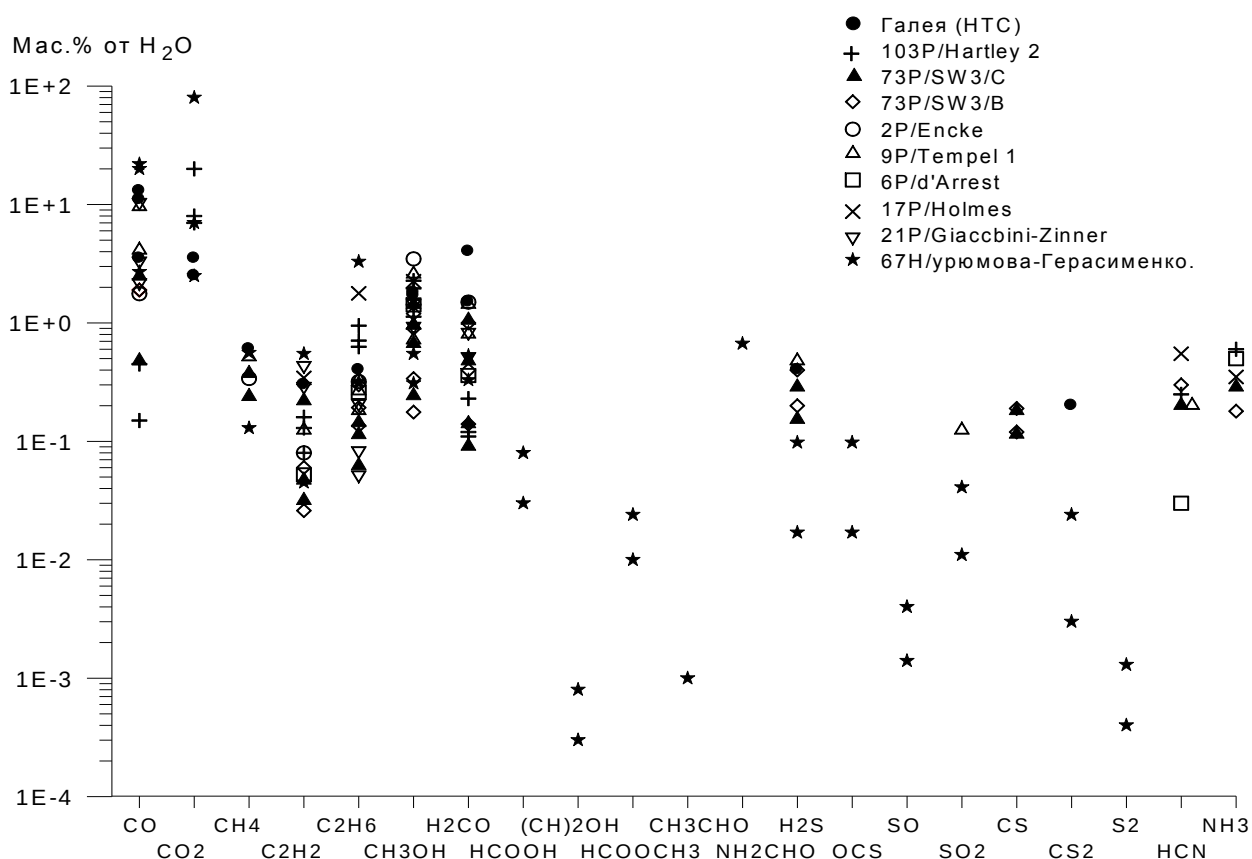


Рис. 1. Содержания компонентов комы комет семейства Юпитера в % от массы H_2O .

Из анализа данных по компонентному и изотопному составу комет следует:

1. Разброс данных по основным компонентам вещества ком (CO , CO_2 , CH_4 , CH_3OH и др.), по которым обычно оценивают состав вещества ядер комет, имеет разброс в 1.5-2 порядка величины.
2. Интенсивность выделения главного летучего компонента комет — воды, относительно которой и определяются содержания всех других летучих, также не является постоянной, а помимо иных факторов, зависит от положения кометы на орбите относительно

перигелия (рис. 2). Из рис. 2 следует, что интенсивность выделения воды в период до достижения перигелия на интервале $\Delta r = 0.13$ а.е. (от $r = 1.19$ а.е. до $r = 1.061$ а.е.) увеличивается в 2.5 раза. Особо отметим тот факт, что значение $Q(H_2O)$, измеренное вблизи перигелия, всего за 0.015-0.012 а.е. до него, совпадает со значениями, полученными на значительном (~ 0.2 а.е.) удалении от него. Это может быть как результатом разрушения (потерь) верхних слоев ядра кометы, так и влиянием тепловой инерции ядра.

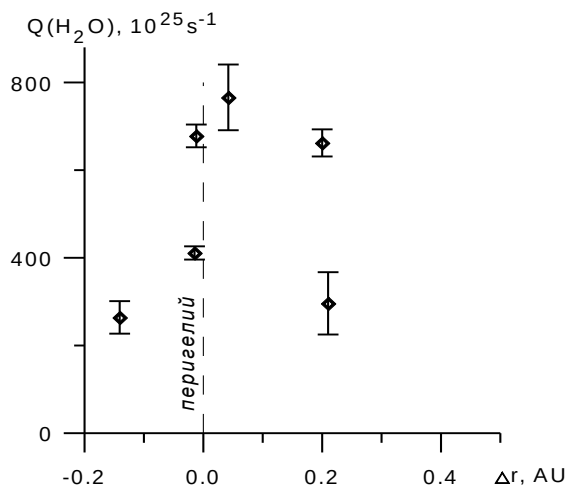


Рис. 2. Интенсивность выделения воды, измеренной в коме кометы 103P/Hartley 2 в зависимости от ее положения относительно перигелия (0 на оси абсцисс).

3. Наблюдаемые различия в изотопном составе водорода в молекуле воды комет различных динамических типов и внутри класса комет семейства Юпитера, представленные на рис. 3, свидетельствует о том, что

- ◆ либо зона образования короткопериодических комет была значительно более протяженной по радиусу, причем наименьшее ее значение не превышало ~ 3 а.е.
- ◆ либо кометы семейства Юпитера захватывались не только из рассеянного диска (SDO – scattered disc object), но и из облака Оорта.

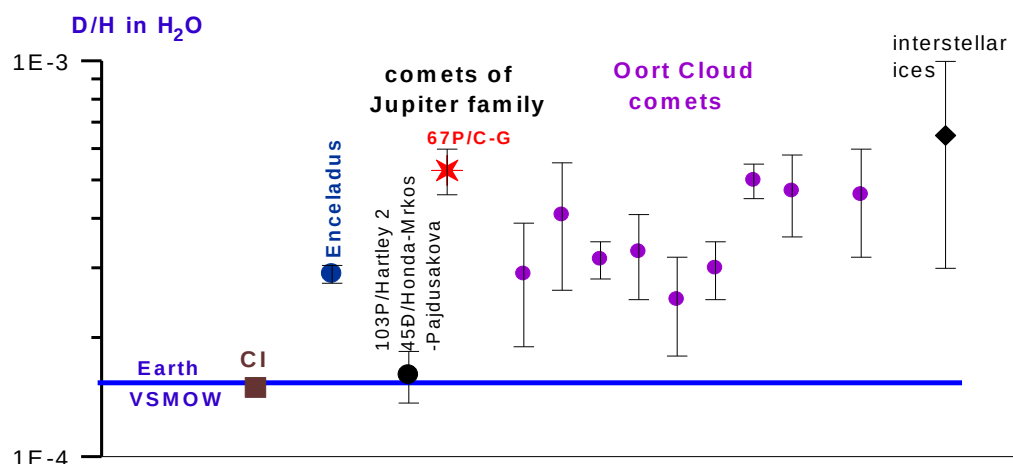


Рис. 3. Изотопный состав водорода в молекуле воды комет различных динамических типов в сопоставлении с данными по D/H для Земли (SMOW), углистых хондритов (CI), водных плюмов Энцелада и межзвездных льдов.

Таким образом, анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных по компонентному и изотопному составу ком 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 *in situ*.

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 (N₂ и CO₂), так и восстановленные формы (NH₃ и CH₄) азота и углерода [Waite et al., 2009], натрий в форме NaCl и Na₂CO₃/NaHCO₃ [Postberg et al., 2009], а также нано частицы SiO₂ [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. Впервые возможные результаты такого взаимодействия были рассмотрены в работах [Glein et al., 2008; Zolotov, Postberg, 2014; Glein 2015]. Принципиально важный вопрос о возможности конверсии аккрецированного NH₃ в N₂ в условиях субповерхностных резервуаров была рассмотрена нами в [Дорофеева, Черкасова, 2014]. В данной работе, в отличие от

предшествующих моделей, изучалось влияние на состав образующихся плюмов Энцелада не только температуры, но также давления и степени полноты протекания реакций в системе твердое-раствор. Модель является более комплексной, поскольку охватывает стадию образования протовещества Энцелада, его аккрецию формирующимся спутником, а также процессы, происходящие при извержении образовавшегося в субповерхностных условиях водного раствора, сопровождающиеся резким понижением давления при относительно небольших колебаниях температур.

Постановка задачи. Выбор исходного состава системы. Оценка состава пылевой компоненты околосолнечного газопылевого протопланетного диска (небулы) изложены в [Дорофеева, 2015]. Состав ледяной фракции, а также масса льда воды определялась соотношением $\text{CO}:\text{CO}_2:\text{CH}_4$, которое является одним из параметров модели. Руководствуясь данными по составу межзвездных и кометных льдов (см. первый раздел), на первом этапе мы приняли, что соотношение $\text{CO}:\text{CO}_2:\text{CH}_4 = 2.9:0.4:0.3$, т.е. $\text{CO}:\text{CH}_4 \approx 10:1$ а соотношение $\text{N}_{\text{N}_2}:\text{N}_{\text{NH}_3} = 10:1$. Состав протовещества Энцелада контролировался температурами как в зоне питания Сатурна в околосолнечном диске, так и в его протоспутниковом диске. Согласно термическим моделям [Дорофеева, Макалкин, 2009; Макалкин, Дорофеева, 2014], протовещество Энцелада могло сохранить такие летучие компоненты, как $\text{CO}_{2(\text{лед})}$, $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}_{\text{кр}}$, H_2S , $\text{CH}_3\text{OH}_{(\text{лед})}$. Аккреция $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}_{\text{кр}}$, или $\text{CH}_{4(\text{лед})}$, а также $\text{CO} \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}_{\text{кр}}$, или $\text{CO}_{(\text{лед})}$, в принципе была возможна, если Энцелад был образован на заключительной стадии формирования регулярных спутников Сатурна и на значительном удалении от центральной планеты.

В качестве модельной рассматривалась 14-ти компонентная закрытая система, состоящая из основных элементов околосолнечного газопылевого диска: H-O-K-Na-Ca-Mg-Cl-Fe-Al-Si-C-N-S-P. Система включала набор индивидуальных твердых фаз постоянного состава (более 60 минералов), водный раствор с ионами и комплексами (более 50 растворенных частиц) и газовую фазу с широким набором S-, N-, C-, O-, H- содержащих компонентов. Оценка изменения давления с глубиной получена в приближении двухслойной модели (ядро-мантия), согласно результатам [Iess et al., 2014]. Температура варьировалась от 90°C до 10°C . Первоначальный состав водных плюмов определялся глубиной, с которой он поступал на поверхность. Рассматривались модели с полным или частичным содержанием летучих, что моделировало разные температуры аккреции первичного каменно-ледяного вещества.

Результаты и выводы. 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 CO_2 , CH_4 и NH_3 могли аккрецироваться в полном объеме, а CO и 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 H_2O плюмов Энцелада и в молекуле CH_4 атмосферы Титана.

Полученные результаты вполне согласуются с наблюдаемым составом водных плюмов Энцелада. Это – карбонатно-хлоридный раствор с высоким (~ 1 моль/кг H_2O) содержанием натрия, при содержании калия на 1-1.5 порядка ниже, содержание магний и кальций $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ моль/кг H_2O соответственно, при содержании $\text{SiO}_{2(\text{p-ор})} \sim 10^{-3}$ моль/кг H_2O . К сожалению, на данном этапе не удалось согласовать по содержанию аммиака полученный при данных составах растворов состав газовой фазы с наблюдаемым – преобладающим азот-содержащим компонентом оказывается N_2 , а не NH_3 , что требует проведения дальнейших исследований. Содержание газовой фазы по углерод-содержащим компонентам согласуется с наблюдаемым – это $\text{CO}_{2(\text{г})}$ и $\text{CH}_{4(\text{г})}$, имеющие примерно равные содержания.

Руководитель проекта:

Дорофеева В.А., ГЕОХИ РАН, e-mail: dorofeeva@geokhi.ru

Состав группы: Дорофеева В.А., д.х.н., внс. ГЕОХИ РАН, Бережной А.А., к.физ-мат.н., снс ГАИШ МГУ, Черкасова Е.В., снс. ГЕОХИ РАН.

Публикации

1. Дорофеева В.А. Строение, состав и условия образования каменно-ледяных планетезималей во внешнем регионе околосолнечного газопылевого протопланетного диска: ограничения для моделей. В сб. Исследования Солнечной системы. Космические вехи. М. 2015. с.400-424.
2. Дорофеева В.А., Черкасова Е.В. Условия образования водных плюмов Энцелада. Термодинамическая модель. XVI Международная конференция Физико-химические и

петрографические исследования в науках о Земле. Москва 28-30 сентября, Борок 2 октября 2015. Материалы конференции. 2015. с. 90-94.

3. V.A.Dorofeeva Studies of comets and problems of cosmochemistry. The Sixth Moscow Solar System Symposium (6M-S3) IKI RAS, 5-9 october 2015. Abstracts. P. 53-54

4.3.3. Термодинамические свойства, фазовые переходы льдов H₂O и химическая дифференциация ледяных спутников Юпитера и Сатурна.

Аннотация. 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.

1. Задачи.

При построении моделей внутреннего строения Титана ключевое значение имеет величина момента инерции спутника. Приведенный момент инерции Титана (I/MR^2), впервые полученный из орбитальных измерений КА «Кассини», оказался равным $0.3414-0.3431 \pm 0.0004$ (Iess et al., 2010; Iess et al., 2012). Данная величина является промежуточной среди моментов инерции аналогичных космических объектов – ледяных спутников Юпитера Ганимеда ($I/MR^2 = 0.3105$) и Каллисто ($I/MR^2 = 0.3549$). Поэтому на основании только численного значения I/MR^2 , используя аналогию со строением Каллисто или Ганимеда (Kuskov, Kronrod, 2001, 2005), невозможно сделать однозначные выводы о внутренней структуре Титана. Кроме того, полученное значение момента инерции $I/MR^2=0.341-0.343$ было рассчитано в предположении гидростатического равновесия спутника. Однако расчеты гравитационного потенциала (Iess et al., 2012), а также результаты длинноволновой топографии (Hemingway et al., 2013) свидетельствуют об отклонении Титана от равновесного состояния, что, следовательно, снижает надежность полученных оценок I/MR^2 . Предположительно, погрешность в вычислении момента инерции, вызванная негидростатическими эффектами, составляет порядка 10% (Gao and Stevenson, 2013), что приводит к разбросу значений I/MR^2 в интервале $0.31 < I/MR^2 < 0.355$ (Baland et al., 2014; Lefevre et al., 2014).

Задачи настоящего этапа заключались в анализе особенностей внутреннего строения частично дифференцированного Титана на едином множестве ограничений по моменту инерции.

2. Модель.

Рассмотрены модели внутреннего строения частично дифференцированного Титана, состоящего из внешней водно-ледяной оболочки (ледяная кора из льда-Ih ± подстилающий водный слой (океан) + льды высокого давления III, V, VI), промежуточной каменно-ледяной мантии (гомогенная смесь льдов высокого давления и скального материала) и центрального железосиликатного ядра. Железокаменная компонента мантии при всех расчетах считалась несжимаемой, ее плотность фиксировалась в диапазоне 3.15-3.62 г/см³, что соответствует плотности L/LL хондритов с учетом гидратации силикатов (Kuskov, Kronrod, 2005). Плотность водных льдов изменялась с глубиной в соответствии с фазовыми переходами в водно-ледяной системе, а также в соответствии с уравнениями состояния индивидуальных кристаллических льдов H₂O. Средняя плотность центрального железосиликатного ядра Титана принималась 3.62 г/см³. Внутреннее строение Титана исследовалось в интервале моментов инерции I/MR^2 0.31-0.37.

3. Результаты.

Для учета погрешности экспериментальных измерений I/MR^2 , а также для оценки влияния момента инерции на степень дифференциации вещества в Титане проведены модельные расчеты внутреннего строения спутника с учетом уравнений состояния высокобарных льдов в широком диапазоне I/MR^2 .

Распределение плотности вещества в Титане строилось с учетом особенностей фазовой диаграммы H₂O, с применением уравнений состояния воды и высокобарных льдов Ih, III, V, VI, VII, устойчивых в ледяной коре и мантии спутника (более плотные разновидности льдов в составе Титана не образуются). Результаты расчетов показали, что плотность ВЛО, а также каменно-ледяной мантии меняется скачкообразно, отражая изменения объемов H₂O при фазовых переходах в воде и льдах (рис. 1). Влияние фазового состава и мощности ВЛО на общее распределение плотности в спутнике, а также на положение границ его структурных областей видно из сопоставления результатов, полученных для различного строения ВЛО. На рис. 1а,б приведено изменение плотности вещества в модели Титана «без океана», рассчитанное для двух вариантов оболочек: внешней ледяной оболочки мощностью 160 км, сложенной льдом Ih, и ледяной оболочки мощностью порядка ~ 440 км, включающей высокобарные льды Ih, III, V, VI.

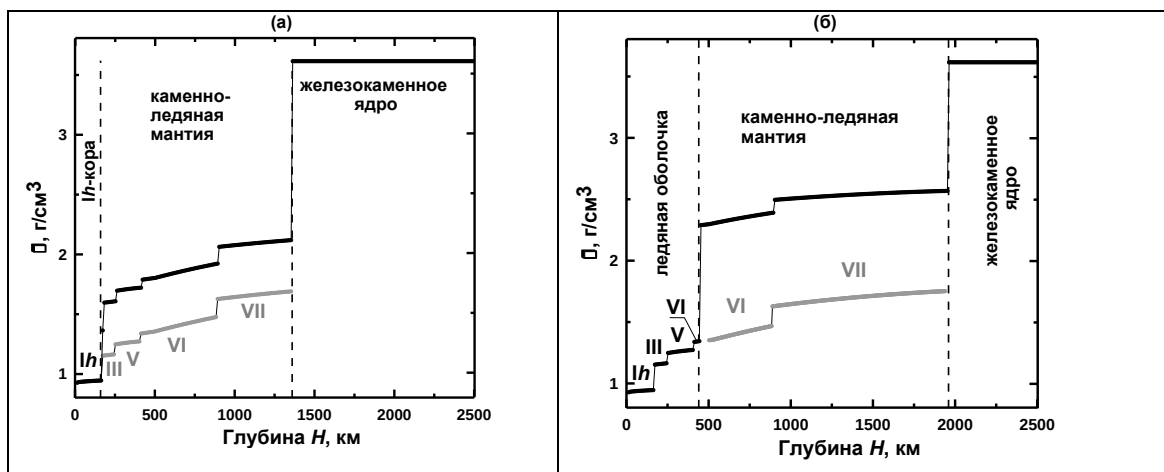


Рис. 1. Распределение плотности вещества в Титане. Иллюстрация к моделям спутника «без океана» (а, б). Черные линии – изменение общей плотности вещества в спутнике. Серый цвет – изменение плотности льдов в каменно-ледяной мантии.

Зависимость внутреннего строения Титана от величины момента инерции показана на рис. 2.

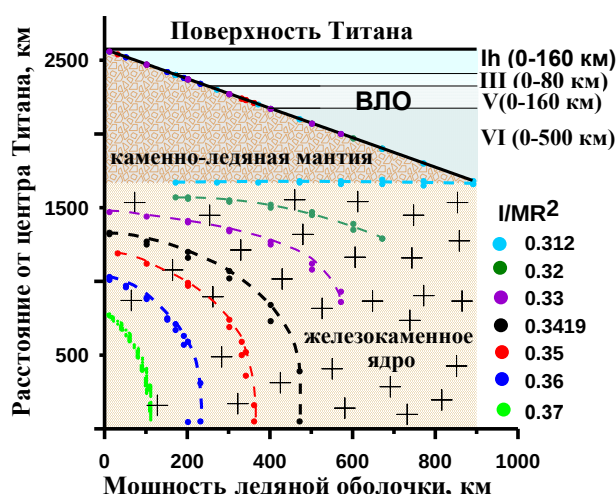


Рис. 2. Строение частично дифференцированного Титана в зависимости от величины момента инерции. Пунктирные линии – положение границы ядро-мантия (радиус ядра) для разных значений приведенного момента инерции I/MR^2 . Точки – диапазон размеров ядра при плотности Fe-Si компоненты мантии $3.15-3.62 \text{ г/см}^3$. Кресты – общая область решений (допустимые размеры железокаменного ядра) при разных моментах инерции. В составе внешней ледяной оболочки римскими цифрами показаны кристаллические фазы водных льдов, а также их допустимая мощность.

4. Основные выводы.

Для модели частично дифференцированного Титана рассчитаны максимальные значения мощности водно-ледяной оболочки и радиуса внутреннего ядра спутника в интервале моментов инерции $I/MR^2=0.312-0.37$. Показано, что при измеренных значениях $I/MR^2=0.3414-0.3431$ максимальные размеры ВЛО составляют 450-470 км при радиусе железокосаменного ядра 1300-1350 км.

Литература:

1. Baland, R.-M., Tobie, G., Lefevre, A., Van Hoolst, T. Titan's internal structure inferred from its gravity field, shape, and rotation state // *Icarus* 237, 29–41. 2014.
2. Bland, M.T., et al.: The orbital–thermal evolution and global expansion of Ganymede, *Icarus*, V.200, pp. 207-221, 2009.
3. Gao, P., Stevenson, D.J. Nonhydrostatic effects and the determination of icy satellites' moment of inertia // *Icarus* 226, 1185–1191, 2013.
4. Hemingway D., Nimmo F., Zebker H., Iess L. (2013) A rigid and weathered ice shell on Titan. *Nature* 500(7464), 550-552.
5. Iess, L. et al. Gravity field, shape, and moment of inertia of Titan. // *Science* 327, 1367–1369, 2010.
6. Iess, L. et al. The tides of Titan // *Science* 337, 457, 2012.
7. Kuskov O.L., Kronrod V.A. Internal structure of Europa and Callisto // *Icarus*. V. 177. P. 550–569. 2005.
8. Kuskov, O.L., Kronrod, V.A.: Core Sizes and Internal Structure of Earth's and Jupiter's Satellites, *Icarus*, V. 151, pp. 204–227, 2001.
9. Lefevre, A., Tobie, G., Choblet, G., Cadek, O. Structure and dynamics of Titan's outer icy shell constrained from Cassini data // *Icarus* 237, 16–28. 2014.
10. Lorenz, R.D. Thermodynamics of geysers: Application to Titan // *Icarus*, Volume 156, Issue 1, pp. 176-183, 2002.
11. Mitri G., Showman A. Thermal convection in ice-I shells of Titan and Enceladus // *Icarus*. V. 193, 387–396, 2008.
12. Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Модели Титана с водно-ледяной оболочкой, каменно-ледяной мантией и ограничениями на состав железокосаменной компоненты // Доклады Академии Наук, 2014, том 454, № 3, с. 1–6.

13. Кронрод В. А., О. Л. Кусков Химическая дифференциация галилеевых спутников Юпитера: 1. Строение водно-ледяной оболочки Каллисто // Геохимия. - 2003. - N 9. - С. 968-983.

Руководитель проекта: Кусков О.Л., ol_kuskov@mail.ru, kuskov@geokhi.ru (ГЕОХИ РАН).

Состав группы: Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. (ГЕОХИ РАН).

Публикации:

1. Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Физико-химические модели внутреннего строения частично дифференцированного Титана // Геохимия, 2016, принято к печати.
2. Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Влияние момента инерции и величины теплового потока на степень дифференциации вещества в Титане // Тр. ВЕСЭМПГ-2015. Т.2, 238-242.

Доклады:

1. Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Физические и термические ограничения на модели Титана с каменно-ледяной мантией // Москва, ВЕСЭМПГ-2015-031.
2. Dunaeva A.N., V. Kronrod, O. Kuskov Physical and thermal constraints on the models of partially differentiated Titan //VI Moscow Int. Solar System Symp., IKI, 2015, 6MS3-GP-01.

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

Аннотация. 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 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.

Астрометрические наблюдения спутников Урана и Юпитера производятся в Пулкове на трех астрометрических инструментах:

Нормальный астрограф

D=330 мм, F=3467 мм

ПЗС SBIG ST-L-11K , FOV = 35'x23',

M=0.533 "/pix.

26-дюймовый рефрактор

D=650 мм, F=10413 мм

ПЗС FliProline 9000 3056x3056 px,

1 px=0.012 мм, FOV 12'x12', M=0.24"/px,

1-м зеркальный телескоп Сатурн (с 2015г.)

D=1000 мм, F=4000 мм

ПЗС S2C , 1046x1140 px, 1 px=0.016 мм, FOV=14'x14', M=0.82"/px

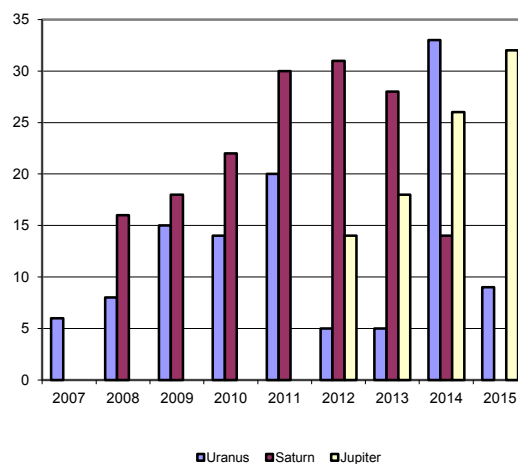


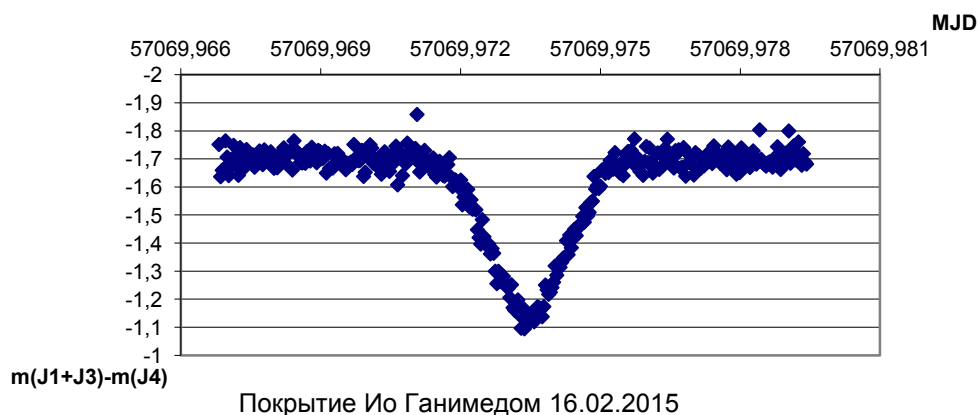
Таблица 1. Статистика наблюдений планет-гигантов и их спутников в 2015г. На рисунке представлены данные за 2007-2015 г. для 26-дюймового рефрактора.

Объект	Норм. астрограф	1-м телескоп	26" рефрактор
Юпитер и галилеевы спутники	8 ночей 970 кадров	-	32 ночей 9600 кадров
Далекие спутники Юпитера (Гималия, Элара, Пасифе и Карме)	2 ночи, 100 кадров	6 ночей 650 кадров	-
Уран и 4 главных спутника U1-U4	9 ночей 250 кадров	-	10 ночей 400 кадров

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. Эфемериды обеспечены веб-сервером “Natural Satellites Ephemeride Server MULTI-SAT” (Emel'yanov N. V., Arlot J.-E., 2008).

Все полученные координаты размещены в пулковской базе данных www.puldb.ru.



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.

Эфемериды взаимных явлений были обеспечены отделом небесной механики ГАИШ и представлены на сервере эфемерид MULTI-SAT (Emelyanov, Arlot, 2008) по адресу <http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/nss/nsszph515he.htm>. 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 Пулковской методике 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, ГАО РАН.

Состав группы: И. С. Измайлов, М. Ю. Ховричев, Т.П. Киселева, Т.А. Васильева, Н.В. Нарижная, А. П. Ершова, И. А. Баляев, Д. А. Биккулова, Л.А. Максимова, К. И. Оськина, А. А. Апетян, А. М. Куликова.

Публикации:

1. Т.П. Киселева, Т.А. Васильева, Е.А. Рощина, И.С. Измайлов. Новая астрометрическая редукция старых фотографических наблюдений спутников Сатурна на основе оцифровки астронегативов / *Астрономический вестник*, 2015, т. 49, № 1, с. 75-78.
2. Т.П.Киселева, Т.А. Васильева, Е.А. Рощина, И.С. Измайлов. Повышение точности фотографических наблюдений 1972-1974 гг системы Сатурна в новой редукции по оцифрованным астронегативам и оценка точности современных теорий движения спутников Сатурна. // *Изв. ГАО* (2015)
3. Е.А. Рощина, И.С. Измайлов, Т.П. Киселева. Астрометрические наблюдения спутников Урана на 26-дюймовом рефракторе в 2007-2011 гг./ *Астрономический вестник*, 2015, т.49, № 3, с. 190-194.
4. Н.В.Нарижная. Результаты наблюдений галилеевых спутников Юпитера на пулковском Нормальном астрографе в период 2009-2011 гг./ *Астрономический вестник*, 2015, т.49, № 6, с.420-427.
5. М. Ю. Ховричев, А. П. Ершова, И. А. Баляев, Д. А. Биккулова, И. С. Измайлов, Е. А. Рощина, В. В. Петюр, А. А. Шумилов, Л.А. Максимова, К. И. Оськина, А. А. Апетян, А. М. Куликова «Астрометрические наблюдения далеких спутников Юпитера на телескопе «САТУРН». Первые результаты» // *Астрономический вестник* (рукопись направлена).

6. Khovritchev M. Yu., Ershova A. P., Balyaev I. A., Bikulova, D. A., Izmailov I. S., Roshchina E. A., Petjur V. V., Shumilov A. A., Maksimova L. A., Oskina K. I., Apetyan A. A., Kulikova A. M.; Astrometric observations of outer Jovian satellites with the 'Saturn' telescope. First results//eprint arXiv:1511.01642;11/2015
7. Бикулова Д.А., Ершова А.П., Измайлов И.С., Ховричев М.Ю., Рощина Е.А., Оськина К.И., Баляев И.А., Шумилов А.А., Петюр В.В., Максимова Л.А., Апетян А.А., Куликова А.М. астрометрические наблюдения на телескопе «САТУРН». Первые результаты. // Изв. ГАО (2015)
8. Е.А. Рощина, И.С. Измайлов, Т.П. Киселева ПЗС-НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКОВ БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ В ПУЛКОВО // Изв. ГАО (2015)
9. И.С. Измайлов, Е.А. Рощина, Д.Л. Горшанов, С. В. Назаров Фотометрические наблюдения взаимных явлений в системе галилеевых спутников Юпитера в 2015 г. // Изв. ГАО (2015)
10. Н.В.Нарижная. Наблюдения галилеевых спутников Юпитера на Пулковском нормальном астрографе. // Изв. ГАО (2015)

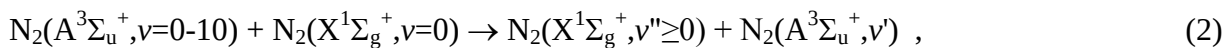
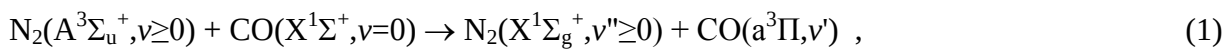
Проект 4.5. Исследования общей циркуляции атмосфер Венеры и Титана, радиационных и кинетических процессов в атмосферах планет земной группы, Титана и Тритона. Исследование общей циркуляции атмосфер Венеры и Титана, а также радиационного нагрева и переноса аэрозолей в этих атмосферах

Аннотация. 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 научных литературе экспериментальных данных для моделирования кинетики азота в смеси газов.

Определены основные механизмы релаксации энергии метастабильного азота при неупругих столкновениях с различными молекулами.

Проведен расчет скоростей гашения метастабильных молекул $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ на молекулах CO и N_2



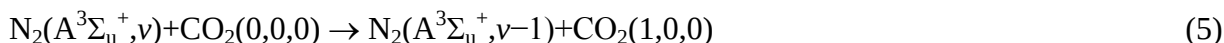
когда происходит перенос энергии возбуждения на молекулу-мишень. Расчет произведен на основании приближений Ландау-Зинера и Розена-Зинера, позволяющих получить следующие формулы

$$k(v) = k_o \sqrt{\frac{T}{300}} \left(1 + 2 \frac{|\Delta E|}{\beta T} \right) \exp \left(- \frac{|\Delta E|}{\beta T} + \frac{\Delta E}{2k_B T} \right) q_{v,v''} q_{v^*,v'} , \quad (3)$$

$$k(v) = k_o \sqrt{\frac{T}{300}} \exp \left(- \frac{|\Delta E|}{\gamma \sqrt{T/300}} + \frac{\Delta E}{2k_B T} \right) q_{v,v''} q_{v^*,v'} , \quad (4)$$

где k_o , β и γ – параметры; $q_{v,v''}$, $q_{v^*,v'}$ – факторы Франка-Кондона для переходов $A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ и $X^1\Sigma^+ \rightarrow a^3\Pi$, $X^1\Sigma_g^+ \rightarrow A^3\Sigma_u^+$; ΔE – дефект энергии; k_B и T – постоянная Больцмана и температура.

Кроме того, собраны данные по константам взаимодействия с молекулами CO_2 и CH_4 , где основными процессами релаксации являются VV-процессы (колебательно-колебательный обмен энергией):



Здесь рассматривается квази-резонанс кванта $N_2(A^3\Sigma_u^+, \Delta v=1)$ и мод колебаний $\nu_1=1338 \text{ см}^{-1}$ для CO_2 и $\nu_4=1306 \text{ см}^{-1}$ для CH_4 .

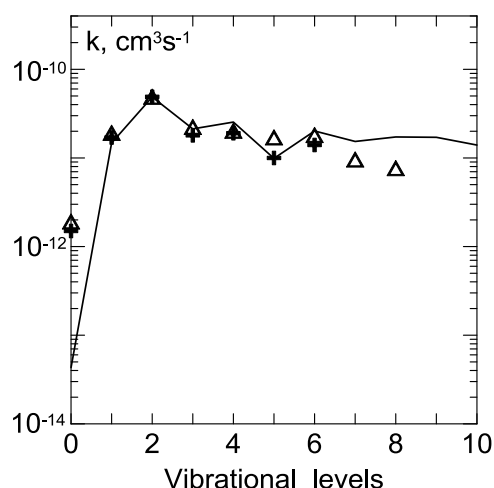


Рис. 1. Рассчитанные константы процесса (1) (сплошные линии) сравниваются с экспериментальными данными [Dreyer et al., 1974, J. Chem. Phys., 61, p. 3164] (треугольники) и [Thomas et al., 1987, J. Chem. Phys., 86, p. 6885] (крестики).

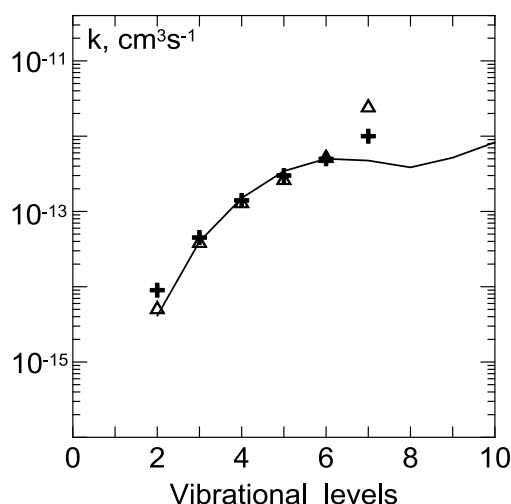
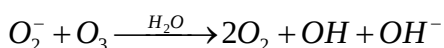
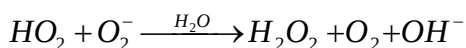
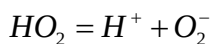


Рис. 2. Рассчитанные константы процесса (2) (сплошные линии) сравниваются с экспериментальными данными [Dreyer and Perner, 1973, J. Chem. Phys., 58, p. 1195] (треугольники) и [Popov, 2013, J. Phys. D, 46, 355204] (крестики).

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).

Один из возможных путей стока озона в атмосфере – так называемое влажное оседание в жидко-капельном водном аэрозоле облаков. Разрушение озона в этом случае происходит при его взаимодействии с гидроокислами и ионами, возникающими при электролитической диссоциации гидропероксидного радикала и перекиси водорода. Основные реакции, приводящие к разрушению озона:



Однако количественные оценки разрушения озона в облаках отличаются у разных авторов многократно и даже на порядок (!), что вызвано, предположительно, очень малым объемом измерений озона и влажности в облаках (требуется самолеты-лаборатории).

Для изучения воздействия облачного водного аэрозоля на вертикальное распределение озона предложено использовать данные вертикального озонозондирования, которое сопровождается одновременной регистрацией озона, температуры и влажности воздуха. Выделение облачных слоев в этом случае можно проводить по методике, принятой в авиационной метеорологии, основываясь на характере вертикального профиля температуры (стратификации) и распределения дефицита точки росы. Использование данного приема позволяет существенно увеличить длину выборки.

Были проанализированы данные 200 озонозондирований на арх. Шпицберген (Нью-Олесунд), произведенных в летний период (июнь-август). Обнаружено, что в случаях прохождения озонозондом облачных слоев большой (по вертикали) мощности наблюдается заметные вариации парциального отношения смеси озона (ПОСО). Однако характер этих изменений неодинаковый от одного зондирования к другому и даже может быть различным в разных (вертикальных) частях одного и того же облачного массива. Это вызвано тем, что в Арктике мощные облачные слои создаются в зонах фронтов, разделяющих различные воздушные массы с разным содержанием озона. Пересечение озонозондом линии фронта в облачном массиве, может в таких случаях сопровождаться как возрастанием концентрации озона в облаке, так и его убыванием (рис. 3). Измерения в таких облачных системах, очевидно, нерепрезентативны для изучения разрушения озона в облачных системах.

При изучении воздействия внутримассовой облачности на вертикальное распределение озона, обнаруживается, что при вхождении озонозонда в облачный слой его показания не уменьшаются, а продолжают возрастать (уменьшение регистрируется только в очень

редких случаях). В случае, если вблизи верхней границы облачности или над ними наблюдается выраженная инверсия, значения ПОСО возрастают. Однако вызвано это, очевидно, не заметным разрушением озона в облачном слое, а наличием инверсии – слоя задерживающего воздухообмен между верхними более насыщенными слоями воздуха и слоем воздуха, в котором расположен облачный слой. В пользу этой версии свидетельствует тот факт, что при отсутствии такой инверсии (и задерживающего слоя) скачка ПОСО вблизи верхней границы нет.

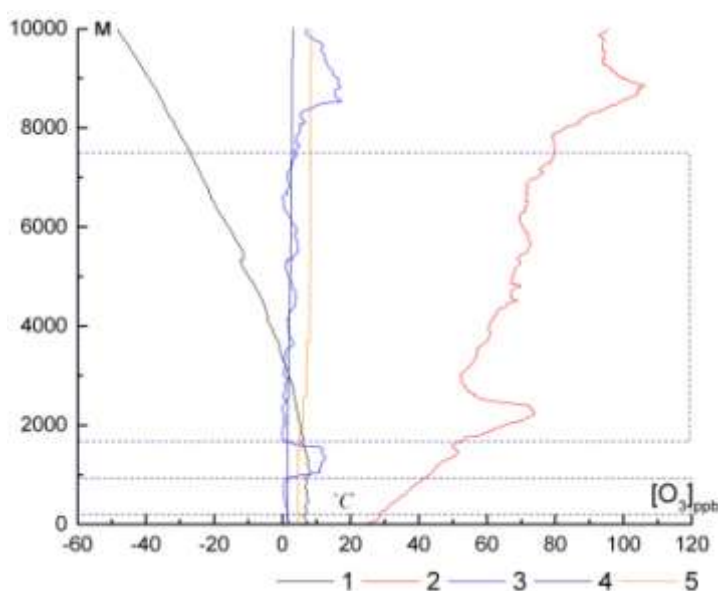


Рис. 3. Вертикальный профиль температуры воздуха (1), ПОСО (2), дефицита точки росы (3) 9.07.2014 в Нью-Олесунне вблизи фронтального раздела; линии 4 (5) – критические значения дефицита точки росы, при значения которых ниже (выше) облачность существует(отсутствует); пунктиром выделены облачные слои.

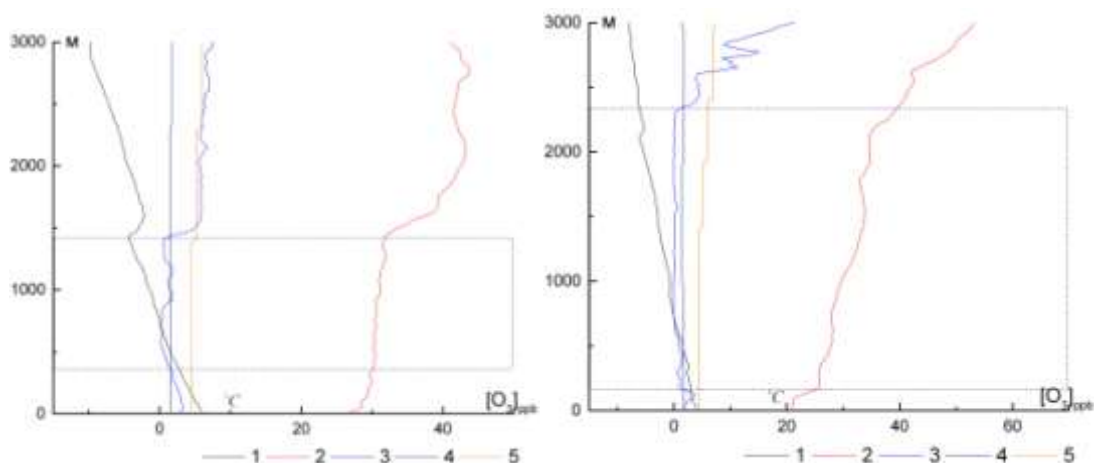


Рис. 4. Вертикальный профиль температуры воздуха, ПОСО и характеристик влажности 26.08.2015 (слева) и 19.08.2015 (справа) в Нью-Олесунне; условные обозначения см. на рис. 1.

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

Состав группы: сотрудники лаборатории №501 Атмосферы Арктики ПГИ: н.с. Демин В.И., вед. электроник Шишаев В.А., программист Антоненко О.В.

Публикации:

1. Kirillov A.S. Intermolecular electron energy transfer processes in the collisions of $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0-10)$ with CO and N_2 molecules. // Chemical Physics Letters, 2015, doi: 10.1016/j.cplett.2015.11.032
2. Демин В.И. Влияние стратификации атмосферы и облачных слоев на вертикальное распределение озона в Арктике // «Оптика атмосферы и океана» (подготовлена к печати).

Доклады:

1. Кириллов А.С. Кинетика электронно-возбужденных состояний N_2 и CO в атмосферах планет земной группы. // Сборник тезисов 10-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН, 16-20 февраля 2015 г., с.77 (устный доклад).
2. Kirillov A.S., Werner R., Guineva V. Kinetics of metastable molecular nitrogen in the atmospheres of planets of Solar system. // Programme of Eleventh Scientific Conference "Space, Ecology, Safety", Bulgarian Academy of Sciences, 4–6 November, 2015, Sofia, Bulgaria, p. 8 (стендовый доклад).