

НАПРАВЛЕНИЕ 4. ПЛАНЕТЫ ГИГАНТЫ, ИХ СПУТНИКИ И КОЛЬЦА

Координаторы: О.Л. Кусков (ГЕОХИ), Ю.М. Торгашин (ИНАСАН), П.А. Беспалов (ИПФ)

4.1.	ПРОЕКТ 4.1. СПУТНИКИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ		
	Тема 4.1.1. Построение численных теорий движения основных спутников систем планет – гигантов и их использование для уточнения эфемерид Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна	ИПА РАН	Питьева Е.В.
	Тема 4.1.2. Позиционные наблюдения спутников планет и исследование их динамики с целью уточнения теорий движения	ГАО РАН	Рощина Е.А. (Грошева)
	Тема 4.1.3. Внутреннее строение и химическая дифференциация Титана	ГЕОХИ РАН	Кусков О.Л.
4.2.	ПРОЕКТ 4.2. МАГНИТОСФЕРЫ И АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ		
	Тема 4.2.1. Исследование структуры токовых слоев, динамики частиц и процессов ускорения в магнитосферах планет гигантов (Юпитер, Сатурн)	ИКИ РАН	Васько И.Ю.
	Тема 4.2.2. Исследование электродинамических процессов в электродинамической цепи, существующей между ионосферами планет-гигантов и их спутниками, и проявлений этих процессов в ускорении частиц и генерации дециметрового, километрового и ультрафиолетового излучений, наблюдающихся от этих планет и их спутников.	ИПФ РАН	Шапошников В.Е.
	Тема 4.2.3. Особенности распределения концентрации фоновой плазмы в магнитосферах планет-гигантов и крупномасштабные токовые системы, обусловленные нетвердотельным вращением магнитосферы	ИПФ РАН	Давыденко С.С.
	Тема 4.2.4. Образование атмосфер спутников Сатурна Титана и Энцелада	ГЕОХИ РАН	Дорофеева В.А.
	Проектов 2, Тем 7		

ПРОЕКТ 4.1. СПУТНИКИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

Тема 4.1.1. Построение численных теорий движения основных спутников систем планет – гигантов и их использование для уточнения эфемерид Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна

Краткий результат: Создана новая версия численных теорий движения галилеевых спутников Юпитера (Ио, Европа, Ганимед, Каллисто) на интервале 1891-2020 гг., представленные 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. Элементы орбит спутников уточнены по 12926 астрометрическим наблюдениям разного типа, выполненным в 1891-2013 гг. В результате улучшения получены уточнённые значения координат и скоростей спутников. Среднеквадратичные ошибки представления наблюдений по прямому восхождению и склонению в большинстве случаев не превосходили их априорных ошибок и составляли $0.01'' - 1.00''$.

Продолжалась работа по уточнению численных эфемерид основных спутников Сатурна (Мимас, Энцелад, Тэфия, Диона, Рея, Титан, Гиперион, Япет, Феба) по наблюдениям на значительно большем интервале, чем ранее, а также теорий движения 5 спутников Урана (Ариэль, Умбриэль, Титания, Оберон, Миранда) и Нептуна (Тритон, Нереида). 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 уточнены эфемериды внешних планет.

В ИПА РАН был создан интерактивный сайт для расчёта эфемерид Солнца, Луны, планет и естественных спутников <http://ephemeris.ipa.nw.ru/>. Поддерживается набор опций для выбора вычисляемых величин, включающий: барицентрические или геоцентрические декартовы координаты, склонение и прямое восхождение, дифференциальные координаты для спутников. По выбору пользователя расчёт положений Солнца, луны и планет происходит с использованием фундаментальных эфемерид семейства EPM, DE или INPOP. Для расчёта эфемерид естественных спутников Юпитера, Сатурна и Урана используются численные теории, разработанные в ИПА РАН, кроме того, в целях

сравнения также доступны аналитические теории для соответствующих спутников разных авторов.

Список публикаций:

1. Космодамианский Г.А., Порошина А.Л., Результаты построения численных теорий главных спутников больших планет. // Труды ИПА («ВАК-2013»), 2014. № 28, 8 с.
2. Порошина А.Л., Численные теории движения Тритона и Нереиды. // Письма в Астр. Журнал, 2013, т. 39, № 12, 969-974.
3. Павлов Д.А., Скрипниченко В.И. Первые результаты опытной эксплуатации кроссплатформенной версии системы ЭРА. // Труды ИПА («ВАК-2013»), 2014. № 28, 8 с.
4. Pitjeva E.V., Pitjev N. P., Development of planetary ephemerides EPM and their applications. // Celest. Mech. & Dyn. Astr., 2014, 119, p.237-256.

Руководитель темы: Питьева Е.В., ИПА РАН, evpitjeva@gmail.com

Тема 4.1.2. Позиционные наблюдения спутников планет и исследование их динамики с целью уточнения теорий движения

Краткий результат: 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 он длиннее, тем точнее будет модель движения. Поэтому в проекте отводится место как продолжению астрометрических наблюдений планет и их спутников, так и более точному измерению старых астронегативов и определению координат тел Солнечной системы в современной системе координат с новейшими каталогами. Телескопы пулковской обсерватории, 26^{см}-рефрактор и Нормальный астрограф, оснащенные ПЗС-камерами, позволяют получать экваториальные координаты спутников планет с точностью на уровне 50 mas и 100 mas соответственно.

В 2014 г. в рамках проекта были выполнены:

- ПЗС-наблюдения спутников Юпитера, Сатурна и Урана;
- Определены экваториальные координаты спутников планет-гигантов по ПЗС-наблюдениям в 2013-2014 гг. на 26^{см}-рефракторе и выполненным в прошлые годы на Нормальном астрографе, а также по астронегативам, снятым в 1972-1974 гг.;

- Полученные экваториальные координаты спутников Сатурна, Урана и Юпитера, вычисленные по наблюдениям и теоретическим планетоцентрическим положениям спутников координаты планет и результаты сравнения положений с теориями движения размещены в пулковской астрометрической базе данных www.puldb.ru.

Список публикаций:

1. Т.П.Киселева, Т.А.Васильева, И.С.Измайлов, Е.А.Рощина, Новая астрометрическая редукция старых фотографических наблюдений Сатурна на основе оцифровки астронегативов // Астрон. Вест., 2015, том 49, № 1, с. 1–3.
2. Dement'eva, A. A. Astrometric observations of Uranus with the Pulkovo Normal astrograph // 2014, Solar System Research, Volume 48, Issue 3, pp.194-201.
3. Е.А. Рощина, И.С. Измайлов, Т.П. Киселева, Астрометрические наблюдения спутников Урана на 26-дюймовом рефракторе в 2007-2011 гг. // Астрон. Вест. (принята к печати, выйдет в январе 2015г.).

Руководитель темы: к.ф.-м.н. Рощина Е.А., ГАО РАН, star-fox@yandex.ru

Тема 4.1.3. Внутреннее строение и химическая дифференциация Титана

Краткий результат: Построены численные модели аккреционных протоспутниковых дисков Юпитера и Сатурна, удовлетворяющие современным космохимическим ограничениям: для диска Юпитера - содержание H_2O в галилеевых спутниках, а для диска Сатурна – наличие твердого соединения – кристаллогидрата аммония NH_4OH , необходимого для объяснения азотной атмосферы Титана. С учетом изменения комплекса входных параметров рассчитаны распределения температур и давлений по радиусу и толщине дисков планет-гигантов, что позволяет оценить наиболее вероятные условия образования их регулярных спутников.

На основе имеющихся геофизических данных методами математического моделирования исследованы ограничения на модели внутреннего строения Титана. В результате работы показано:

- Модели внутреннего строения Титана сводятся в основном к двум вариантам: частично или полностью дифференцированного Титана. Построены трехслойные модели, включающие: внешнюю водно-ледяную оболочку (ледяная кора из льда $Ih \pm$ океан + льды высокого давления); промежуточную каменно-ледяную мантию из смеси льдов и скального материала (силикатов и/или гидросиликатов + Fe-FeS сплав); центральное железокаменное (Fe-Si) ядро, не содержащее льда.

- Детально проанализированы модели внутреннего строения частично дифференцированного Титана с каменно-ледяной мантией. Показано, что при моменте инерции $I/MR^2=0.342$ спутник состоит из внешней водно-ледяной оболочки мощностью до 470 км, внутреннего железосиликатного ядра радиусом до 1300 км и промежуточной каменно-ледяной мантии плотностью 1.22-2.64 г/см³.

- Общее содержание воды в Титане оценивается в 45-53%. Независимо от величины момента инерции спутника отношение в нем вода/порода остается примерно равным единице, что соответствует таковому в крупных ледяных спутниках Юпитера Ганимеде и Каллисто.

Список публикаций:

1. Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Модели Титана с водно-ледяной оболочкой, каменно-ледяной мантией и ограничениями на состав железокремниевой компоненты. Доклады Акад. Наук. 2014. 454 (3) 334-339, DOI: 10.7868/S0869565214030189
2. Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Отношение H₂O (лед, вода)/порода в моделях Титана с каменно-ледяной и гидросиликатной мантией // Эксперим. геохимия. 2014. Т.2 стр. 39-44.

Руководитель темы: чл.-корр. РАН Кусков О.Л., ГЕОХИ РАН, ol_kuskov@mail.ru

ПРОЕКТ 4.2. МАГНИТОСФЕРЫ И АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

Тема 4.2.1. Исследование структуры токовых слоев, динамики частиц и процессов ускорения в магнитосферах планет гигантов (Юпитер, Сатурн)

Краткий результат: По данным аппарата Venus Express исследована структура токового слоя в магнитосферном хвосте Венеры. Показано, что профили магнитного поля обладают двухмасштабной структурой. Показано, что наблюдаемые особенности структуры магнитного поля обусловлены многокомпонентным ионным составом плазмы токового слоя (протоны солнечного ветра и ионосферные ионы кислорода). Предсказано, что токовый слой представляет собой кинетическую структуру с пространственным масштабом порядка ионного гирорадиуса.

По данным аппарата Galileo исследована вертикальная и горизонтальная структура токового слоя в магнитосферном хвосте Юпитера. Показано, что токовый слой является частично бессильным - плотность тока имеет существенную компоненту вдоль магнитного поля, магнитное поле имеет существенную шировую компоненту с максимумом в нейтральной плоскости. Профиль плотности тока имеет два характерных

масштаба: тонкий токовый слой с толщиной порядка нескольких гирорадиусов тепловых ионов серы вложен в толстый токовый слой с толщиной порядка нескольких радиусов Юпитера. Таким образом, токовый слой представляет собой кинетическую структуру. Используя измерения на различных расстояниях от планеты исследована горизонтальная структура токового слоя. Показано, что толщина токового слоя практически не варьируется с удалением от планеты, так что структура токового слоя не может быть описана в рамках двумерных изотропных МГД моделей. Показано, что структура токового слоя описывается в рамках одномерных моделей с анизотропным тензором давления.

Список публикаций:

1. Vasko I. Y., L. M. Zelenyi, A. V. Artemyev, A. A. Petrukovich, H. V. Malova, T. L. Zhang, A. O. Fedorov, V. Y. Popov, S. Barabash, R. Nakamura. The structure of the Venusian current sheet. *Planetary and Space Science* 96, (2014) 81–89.
2. Artemyev A.V., I.Y.Vasko, S.Kasahara, Thin current sheets in the Jovian magnetotail. *Planetary Space Science*, 96 (2014) 133–145.

Руководитель темы: к.ф.-м.н. Васько И.Ю., ИКИ РАН, vaskoiy@yandex.ru

Тема 4.2.2. Исследование электродинамических процессов в электродинамической цепи, существующей между ионосферами планет-гигантов и их спутниками, и проявлений этих процессов в ускорении частиц и генерации дециметрового, километрового и ультрафиолетового излучений, наблюдающихся от этих планет и их спутников

Краткий результат: Спутник Юпитера Ио играет важную роль во многих процессах, происходящих в магнитосфере планеты. Информация об условиях в его ближайшем окружении в основном идет от спутниковых и наземных наблюдений излучения в различных диапазонах частот. В последние годы после на космическом телескопе Хаббл (Hubble) были получены новые интересные результаты. В частности, были обнаружены два очень ярких источника ультрафиолетового излучения (экваториальные споты), которые располагались на лимбе Ио вблизи его экватора. Это ультрафиолетовое излучение было отождествлено с линиями атомов серы и кислорода, возбуждаемых электронным ударом. Одно из интересных особенностей спотового излучения было обнаружено Retherford et al. 2000 (Retherford, K. D., Moos, H.W., Strobel, D.F., Wolven, and B.C., Roesler, F.L. Io's equatorial spots: Morphology of neutral UV emissions. *J. Geophys. Res.*, V. 105, pp. 27157-27166, 2000). В этой работе было показано, что яркость излучения

ультрафиолетовых спотов коррелирует с магнитной долготой спутника Ио и, следовательно, с положением Ио относительно центра плазменного тора Ио. Retherford et al. 2000 связывают наблюдаемую корреляцию с неоднородностью плазменного тора Ио. В работе Shaposhnikov et al. 2013 (Shaposhnikov, V.E., Zaitsev, V.V., Rucker, H.O., and Litvinenko, G.V. On ultraviolet emission observed on the flanks of Io. J. Geophys. Res. V. 118, pp. 4248-4252, 2013) был предложен механизм, обеспечивающей экваториальные споты энергией, достаточной чтобы объяснить их высокую яркость в ультрафиолетовом диапазоне волн. Было показано, что за возбуждение нейтрального кислорода в наиболее ярких областях экваториальных спотов ответственны электроны, образовавшиеся в результате дополнительной ионизации атмосферы в лобовой части спутника и сместившиеся на фланги спутника вместе с магнитным полем Юпитера, обтекающему спутник. В этом случае яркость источника оказывается пропорциональной четвертой степени напряженности магнитного поля Юпитера в области генерации излучения. Магнитное поле Юпитера неоднородно вдоль траектории спутника. В настоящей работе было показано, что наблюдается хорошая корреляция между яркостью ультрафиолетового излучения и величиной магнитного поля и магнитной долготой спутника.

Указано, что благодаря корреляции между величиной потока ультрафиолетового излучения и величиной магнитного поля планеты, наблюдения ультрафиолетового излучения экваториальных спотов могут служить независимой радиоастрономической проверкой создаваемых моделей магнитного поля Юпитера.

Список публикаций:

1. EPSC2014-42. Effect of Jovian magnetic field on Io's spot emission. Shaposhnikov V., Rucker H., Zaitsev V., Litvinenko G. (European Planetary Science Congress EPSC 2014, Estoril, Cascais, Portugal, 7 – 12 September 2014)

Руководитель темы: д.ф.-м.н. Шапошников В.Е., ИПФ РАН, sh130@appl.sci-nnov.ru

Тема 4.2.3. Особенности распределения концентрации фоновой плазмы в магнитосферах планет-гигантов и крупномасштабные токовые системы, обусловленные нетвердотельным вращением магнитосферы

Краткий результат: Разработана численная модель квазистатических полей и токов в планетарной атмосфере, обусловленных локализованным импульсным электрическим источником. Получены оценки полей и структура возникающей токовой системы для параметров источников, типичных для молниевых разрядов.

Разработана численная модель квазистатических полей и токов в проводящей атмосфере, обусловленных импульсным электрическим источником. Модель основана на решении полной системы уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области в применении к релаксации возникшего в результате работы источника возмущения пространственного заряда. Источник описывается локализованным импульсным сторонним током, пространственно-временные параметры которого, в частности, могут соответствовать различным типам электрических разрядов (в земной атмосфере – внутриоблачному разряду либо разряду облако–земля). Квазистатический характер возникающих электрических полей обусловлен выбором соответствующего временного профиля разрядного тока. Направление разрядного тока произвольно, что позволяет описывать пространственную асимметрию формирующегося после разряда возмущения плотности заряда. Модель позволяет учесть возмущение электрической проводимости в окрестности разряда, при этом форма области разряда может быть произвольной. Предполагается, что в нижних слоях планетарной атмосферы электрическая проводимость экспоненциально растёт с высотой, выше определённого уровня (высота мезопаузы в земной атмосфере) проводимость анизотропна. Проанализирована зависимость характеристик всплеска квазистатического электрического поля в верхних слоях атмосферы от пространственно-временных параметров разрядного тока, возмущения электрической проводимости в окрестности источника, проводимости верхних слоёв атмосферы и расстояния до области источника. Модель позволяет определить квазистатические поля и токи импульсных электрических источников в верхних слоях планетарной атмосферы, что важно для оценки их вклада в формирование глобальной атмосферно-ионосферной токовой системы и сопоставления последнего с полями и токами, обусловленными нетвердотельным вращением планетарной плазменной оболочки.

Список публикаций:

1. Davydenko S.S., Savikhin S.A., Sergeev A.S., and Zolotov S.A., Electromagnetic response of the inhomogeneous anisotropic atmosphere to a single lightning discharge / Proc. Int. Symposium «Topical problems of nonlinear wave physics. Nonlinear phenomena in geophysics». Nizhny Novgorod, Russia, 2014. Pp.149-150.
2. Davydenko S.S., Savikhin S.A., Sergeev A.S., and Zolotov S.A., 3D modeling atmospheric electric field and current caused by a lightning discharge / Proc. 15th Int. Conf. on Atmospheric Electricity. Norman, USA, 2014. Paper P-08-25, pp.1-7.

Руководитель темы: к.ф.-м.н. Давыденко С.С., ИПФ РАН, davyd@appl.sci-nnov.ru

Тема 4.2.4. Образование атмосфер спутников Сатурна Титана и Энцелада

Краткий результат: Построены численные модели аккреционных протоспутниковых дисков Юпитера и Сатурна [1], удовлетворяющие современным космохимическим и физическим ограничениям [2]. С учетом изменения комплекса входных параметров рассчитаны распределения температур и давлений по радиусу и толщине дисков планет-гигантов, что позволило оценить наиболее вероятные условия образования их регулярных спутников [3]. В рамках предложенной модели образования азотной атмосферы Титана в результате взаимодействия внутри каменно-ледяного протоспутникового тела каменной компоненты с водным раствором, содержащим растворенные газы - CO_2 , NH_3 , CH_4 исследовано влияние основных параметров модели: соотношения в газовой фазе небулы основных азот- и углерод содержащих компонентов: $\text{N}_2:\text{NH}_3$ и $\text{CO}_2:\text{CH}_4:\text{CO}$, а также степень полноты их аккреции [4]. Выявлены условия, при которых N_2 становится преобладающим азот-содержащим компонентом газовой фазы системы, а его поступление в атмосферу вместе с метаном в результате криовулканической деятельности вполне вероятным.

Показано, что кометное вещество играло существенную роль в формировании регулярных спутников Сатурна – Титана и Энцелада [5]. Вместе с ним на спутники поступали летучие компоненты, а также органические соединения, многие из которых могли играть существенную роль в предбиологических процессах в ранней Солнечной системе. Для получения информации о составе органического вещества комет по спектральным данным начато построение квантово-химических моделей. К настоящему времени построена квантово-химическая модель флюоресценции и поглощения газофазного пирена и пирена в окружении водяного льда. Сравнение полученных теоретических спектров с экспериментальными показало их удовлетворительное совпадение [6].

Список публикаций:

1. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. Аккреционные диски вокруг Юпитера и Сатурна на стадии образования регулярных спутников. *Астроном. вестник*, 2014, т. 48, № 1, с. 64-80.
2. Дорофеева В.А. Строение, состав и условия образования каменно-ледяных планетезималей во внешнем регионе околосолнечного газопылевого протопланетного диска: ограничения для моделей. В сб. к 80-летию М.Я.Марова, ИКИ, 2014 (в печати).

3. Макалкин А.Б., Дорофеева В.А. Условия образования регулярных спутников в аккреционных дисках Юпитера и Сатурна. В сб. к 80-летию М.Я.Марова, ИКИ, 2014 (в печати).
4. Дорофеева В.А., Черкасова Е.В. Происхождение N_2 в атмосфере Титана – термодинамическая модель. Экспериментальная геохимия. 2014. Т.2 стр. 33-38.
5. Дорофеева В.А. Кометное вещество и его роль в формировании регулярных спутников Юпитера и Сатурна. Сборник трудов международной конференции "V Бредихинские чтения". Москва, Изд. Янус-К. 290 стр. ISBN 978-5-8037-0625-0. с. 87-113. 2014.
6. Freidzon A.Ya., Valiev R.R., Berezhnoy A.A. Ab Initio Simulation of Pyrene Spectra in Water Matrices, RSC Advances, V. 4, Is. 79, p. 42054 – 42065, 2014.

Руководитель темы: д.х.н. Дорофеева В.А., ГЕОХИ РАН.