

Программа № I.9

«Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд». Координатор академик Л.М.Зеленый

Важнейшие результаты за 2015 г.

Проект 1.4. Моделирование эволюции разреженных сгущений и образования первичных твердых тел в протопланетном диске.

Проведены исследования процессов ранней эволюции газопылевого протопланетного диска. Получен модифицированный критерий гравитационной неустойчивости пылевой фазы в диске конечной толщины на основе решения линейной системы уравнений для малых радиальных возмущений скоростей и плотностей пылевой и газовой фаз диска в приближении несжимаемого газа и в зависимости от размера частиц. Проведено численное моделирование образования и эволюции пылевых сгущений в диске на основе численного моделирования взаимодействия наноразмерных частиц. Математическая реализация модели основана на методе проницаемых частиц, который позволил учесть внутреннюю структуру объектов и сложный характер их взаимодействия. Найдены условия, при которых может происходить полное или частичное разрушение одного или обоих объектов с последующим рассеиванием фрагментов или обратной частичной аккумуляцией. Сделан вывод о том, что предложенная модель динамических процессов в зоне контакта частиц при соударениях адекватно описывает перераспределение энергии между процессами различной природы и может эффективно применяться при построении моделей столкновительной эволюции пылевых фрактальных кластеров и тел в протопланетном диске.

Руководитель темы: д.физ.-мат.н., зав. отд. ГЕОХИ РАН, академик Маров М.Я., marovmail@yandex.ru

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликованы 3 статей.

Проект 2.8. Теория, экспериментальные исследования и численное моделирование магнитогидродинамической турбулентности в солнечном ветре и образование ударных волн в астрофизических объектах»

Разработана теория и численные методы моделирования, лабораторные методы получения ударной волны Тейлора и стационарной ударной волны с интенсивностью ~ 1 кбар в слое воды толщиной 1 мм. Волна Тейлора создается при помощи короткого (10 нс) импульса лазерного излучения с энергией 0.35 Дж, стационарная ударная волна создается в исследуемом слое ударником, летящим со скоростью ~ 100 м/с. Разработана расчетная модель методов получения ударных волн в слое воды.

Получены уравнения и поставлены задачи МГД-турбулентности в формализме Эльзассера и получены моментные уравнения, позволяющие моделировать турбулентность солнечного ветра и другие задачи планетной астрофизики, разработаны программы моментного и прямого численного моделирования МГД-турбулентности.

Руководитель проекта:

Сон Эдуард Евгеньевич, д.ф.-м.н., член-корр. РАН, son.eduard@gmail.com

Объединенный институт высоких температур РАН

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликовано 7 статей

Проект 2.13. Глобальные комплексы активности и соотношение магнитных полей различных пространственных масштабов.

Предложен и обоснован новый механизм ускорения частиц в солнечном ветре до энергий порядка 1-1.5 МэВ, который способен объяснить часто наблюдающиеся нетипичные всплески интенсивности потока энергичных протонов и электронов на околоземной орбите [1-6], не связанные со вспышками или ускорением частиц на ударных волнах.

Показано, что подобные случаи связаны с пересечением областей, заполненных мелкомасштабными магнитными островами ($1\sim 0.01-0.001$ а.е.) и ограниченных магнитными стенками, представляющими собой токовые слои разного масштаба и формы. В соответствии с предложенной теорией, динамические процессы в магнитных островах (такие как их слияние или сжатие) приводят к локальному ускорению частиц, имеющих до этого лишь небольшое предускорение. Такое изначальное ускорение может являться следствием стандартных механизмов придания частицам дополнительной энергии, а также следствием магнитного пересоединения в токовых слоях, в частности, в гелиосферном токовом слое (ГТС) или его окрестности – плазменном слое.

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликовано 9 статей.

Руководители проекта: В.Н. Обридко, В.Д. Кузнецов (ИЗМИРАН).

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. Показано, 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*.

Проведено моделирование водных плюмов Энцелада наблюдаемого состава с целью реконструировать условия их образования. Предположено, что состав плюмов был обусловлен главным образом составом ледяной компоненты протовещества спутника. 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. Полученные результаты вполне согласуются с наблюдаемым составом водных плюмов Энцелада

Руководитель проекта:

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

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

Проект 3.2. Сейсмология и физика недр Марса.

Для выяснения возможности регистрации следов воды на Марсе при сейсмическом эксперименте проведена численная оценка изменения теоретического годографа и спектра собственных колебаний Марса из-за эффекта гидратации.

Количественные оценки эффектов гидратации на сейсмические скорости в оливине, вадслеитеи рингвудите для предполагаемого содержания железа в мантии Марса представляют интерес для прогнозирования сейсмического отклика планеты. Важно определить глубину фазового перехода в мантии Марса, поскольку это зафиксирует распределение температуры. Наложение ограничений на состав мантии и возможная локализация зоны фазового перехода – одна из задач будущих сейсмических экспериментов.

Руководитель проекта: Жарков Владимир Наумович ИФЗ РАН zharkov@ifz.ru

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликованы 8 статей.

Проект 3.4. Термохимические модели ядра и мантии Луны.

Реализован новый подход к исследованию термохимических моделей мантии Луны, основанный на преобразовании профилей скоростей сейсмических волн в соотношения температура – глубина с помощью методов термодинамики и физики минералов.

Установлены термохимические ограничения на тепловой режим, состав и минералогию верхней мантии Луны по сейсмическим моделям, и проведено согласование моделей внутреннего строения Луны с данными гравитационного поля. Наиболее вероятным составом верхней мантии является оливин-содержащий пироксенит, обедненный тугоплавкими оксидами (~2 мас.% CaO и Al₂O₃, $\rho \sim 3.33-3.34$ г/см³). Модели, обогащенные Ca и Al, не могут рассматриваться в качестве петрологической основы верхней мантии, поскольку приводят к нереалистичным температурам (вблизи или выше солидуса). Максимальная величина теплового потока в верхней мантии составляет 3.8-4.7 мВт/м², что в два-три раза меньше величин теплового потока 7-13 мВт/м² по данным измерений по программе «Apollo» и распространенности тория (Keihm, Langseth, 1977). На основе этих и литературных данных оценены верхние пределы значений полного теплового потока с поверхности 6.2-9.6 мВт/м² и валового содержания урана в Луне на уровне 15-23 ppb.

Руководитель проекта: Кусков О. Л. ГЕОХИ РАН (ol_kuskov@mail.ru);

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликовано 5 статей.

Проект 5.1. Моделирование УФ свечений атомов водорода и кислорода в планетных коронах с учетом надтепловых характеристик среды

Оценены скорости нетепловой диссипации нейтральной верхней атмосферы Марса как за счет фотохимических процессов, так и воздействия плазмы солнечного ветра.

Получены оценки нетепловых потерь тяжелых атомов – углерода и кислорода – современной атмосферой Марса как за счет фотохимических процессов, так и воздействия плазмы солнечного ветра. Установлено, что полная плотность экзосферы регулируется главным образом диссоциативной рекомбинацией молекулярных ионов O₂⁺, CO₂⁺, приводя к потоку убегания около 3×10⁷ см⁻²с⁻¹ и полной скорости потери около 3×10²⁵ с⁻¹ атомов кислорода из современной атмосферы Марса в условиях низкой и высокой солнечной активности. Расчеты также показывают, в согласии с предыдущими исследованиями, что основным каналом потери атомарного углерода из атмосферы Марса в настоящее время является фотодиссоциация CO и CO₂. Воздействие плазмы солнечного ветра сопровождается переносом энергии протонов и атомов водорода с высокими кинетическими энергиями из солнечного ветра в столкновениях с нейтральными частицами верхней атмосферы Марса. Отмечена доминантная роль в диссипации атмосферы данного процесса при солнечных вспышках.

Руководитель проекта: Шематович В.И., Институт астрономии РАН, shematov@inasan.ru

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

2 доклада на международных конференциях.

Проект 5.3. Влияние вариаций ионизирующего излучения, аккреции межзвездной и межпланетной пыли, падения крупных тел на состав и химию атмосферы и климата Земли и Марса.

В 2015 году в рамках проекта проведены модельные расчеты ионизации атмосферы и образования радионуклидов в атмосфере Земли под действием сверхмощных солнечных вспышек с использованием двух различных моделей внутриядерного каскада, используемых в последней версии численного кода GEANT4.

Работа продолжает начатые в 2013 году исследования природы открытого в 2012 году по измерениям космогенного радионуклида ^{14}C в кольцах деревьев необычно мощного импульсного воздействия на атмосферу Земли высокоэнергичного космического излучения в 775 году (Miyake et al., Nature, 2012). Были использованы новые данные по измерениям других долгоживущих радионуклидов (^{10}Be и ^{36}Cl) в кернах ледников Гренландии и Антарктиды. В качестве возможных причин события 775 года рассматриваются сверхмощная вспышка на Солнце, галактический гамма-всплеск.

Результаты расчетов подтвердили полученные ранее выводы, что событие 775 года должно было, в зависимости от «жесткости» спектра, в 20-160 раз превосходить по мощности вспышки 1956 и 1972 года, и полная энергия события должна была составлять $>10^{34}$ эрг. На основе имеющихся данных по содержанию изотопов в кольцах деревьев и кернах льдов Антарктики и Гренландии сделан вывод, что события 775 и 993 года могут быть объяснены только «мягкой» супервспышкой или галактическим гамма-всплеском.

Анализ наблюдаемых сигналов ^{10}Be показал, что важную роль играют процессы резкого ускорения обмена между стратосферой и тропосферой и инжектирования стратосферного ^{10}Be без значительного общего дополнительного производства ^{10}Be в событии 775 года. Моделирование показывает, что такое ускорение может быть достигнуто за счет образования большого количества NOx в атмосфере и частичного разрушения озонового слоя в реакциях с ними.

Руководитель темы: А.К. Павлов, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, anatoli.pavlov@mail.ioffe.ru

Проект 7.3. Пространственная структура и динамика проявления флуктуаций ГЛОНАСС/GPS сигналов в Арктике и их влияние на точность позиционирования.

Одним из индикаторов состояния космической погоды являются флуктуации и сцинтилляции трансионосферных сигналов в высокоширотной ионосфере. Флуктуации и сцинтилляции сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС/GPS обусловлены с эффектами рефракции и дифракции сигналов на ионосферных неоднородностях. В высокоширотной ионосфере присутствуют как мелкомасштабные, так и крупномасштабные неоднородности. Флуктуации и сцинтилляции могут вызывать нарушение фазового синхронизма за счёт скачков фазы когерентных сигналов L1/L2, что приводит к срывам приема сигналов. В конечном итоге это влияет не только на точность, но и возможность местоопределения. Особенно это касается навигации в Арктике в периоды геомагнитных возмущений. В рамках темы был проведен анализ использования для мониторинга ионосферы отечественной космической навигационной системы ГЛОНАСС. Показано что, ГЛОНАСС более эффективна для исследования высокоширотной ионосферы. Была разработана методика получения данных о вариациях полного электронного содержания ионосферы (TEC) по двухчастотным измерениям задержек ГЛОНАСС сигналов. Были проведены дополнительные исследования по проявлению флуктуаций навигационных сигналов и их связи с авроральной активностью во время геомагнитного возмущения 2 октября 2013г.

Руководитель темы: Шагимуратов И.И., Калининградский филиал ИЗМИРАН, shagimuratov@mail.ru

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликованы 4 статьи.

Проект 8.1.2. Разработка методов управления малыми астероидами с целью их захвата на орбиту спутника Земли за счет использования гравитационных маневров в системе Солнце-Земля и системе Земля-Луна

В рамках проведенных исследований разработан способ захвата малых околоземных астероидов или их фрагментов на орбиту спутника Земли. Реализуемость способа показана на примере двух астероидов, для захвата которых достаточно в номинальном случае сообщить астероиду импульс скорости в пределах 20 м/с, переводящий его на серию гравитационных маневров в окрестности Земли и Луны.

В настоящей работе сделан следующий шаг в решении задачи управления астероидами: разработан способ их захвата на орбиту спутника Земли, опирающийся на возможности многократных гравитационных маневров в системе Солнце-Земля и системе Земля-Луна. Идея метода заключается в изначальном переводе астероида на орбиту, резонансную с Землей, с последующими многократными гравитационными маневрами у Луны при сохранении резонансности с движением Земли. Подтверждение выполнимости такого подхода при сохранении запаса рабочего тела в допустимых по техническим возможностям современных носителей пределах получено моделированием управления для двух околоземных астероидов.

Руководитель темы: Эйсмонт Натан Андреевич, ИКИ РАН. neismont@rssi.ru

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликованы 6 статей.

Проект 8.8. Изучение процессов формирования и эволюции поверхности, а также состава ядра кометы 67P Чурюмова-Герасименко по данным миссии «Розетта» в сравнении с таковыми ядер других комет.

Работа проводилась по двум направлениям: 1) изучение морфологии поверхности ядра кометы 67P с попыткой интерпретации, как наблюдаемые формы рельефа и типы местности были образованы, и как они будут изменяться с течением времени, и 2) изучение состава вещества поверхности и отлетающих от ядра газов и пыли с попыткой понять состав неизмененного вещества ядра и его возможные вариации в пределах ядра кометы 67P и от кометы к комете. В 2015 г. установлено, что консолидированный материал ядра кометы имеет «зернистое» сложение в широком диапазоне размеров – от нескольких метров, до сантиметров и может быть до сотен микрон. Оценены величины его прочности, которые с учетом масштабного эффекта оказались близкими к таковым снега при -10°C . Обнаружены следы перемещения материала вниз по склонам в виде оползней, падений валунов и осыпания тонкозернистого материала. Составлена сводка полученных к настоящему времени данных по минеральному и химическому составу материала ядра, по химическому и изотопному составу газов комы. По последнему пункту, возможно, наиболее важное космохимическое значение имеет определение изотопного состава водорода в молекулах воды кометы 67P. Полученное значение $D/H = 5.3 \times 10^{-4}$ более чем в три раза больше земной величины 1.56×10^{-4} и значений для двух других комет семейства Юпитера - 103P/Hartley 2 и 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková, что ставит под сомнение тезис о том, что все кометы семейства Юпитера принадлежали только крассеянному диску (SDO - scattered disc object).

Руководитель темы: Базилевский А.Т. Alexander_Basilevsky@brown.edu

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликованы 6 статей.