

Направление 1. Формирование и эволюция Солнечной системы

Кураторы направления акад. М.Я Маров (ГЕОХИ РАН), А.В. Колесниченко (ИПМ РАН)

1.1	ПРОЕКТ 1.1: СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ ГАЗОПЫЛЕВЫХ ДИСКОВ И ПРОТОПЛАНЕТ		
	Тема 1.1.1. Создание математических моделей структуры и эволюции газопылевых аккреционных турбулентных дисков, образования пылевых сгущений и первичных твёрдых тел.	ИПМ РАН	Колесниченко А.В.
	Тема 1.1.2. Исследование динамической и космогонической эволюции Солнечной и экзопланетных систем	ГАО РАН	Шевченко И.И.
	Тема 1.1.3. Торможение, разрушение и захват гиперзвуковых бolidов аккреционными дисками планет гигантов	ГЕОХИ РАН	Кронрод В.А.
	Тема 1.1.4. Исследование столкновительных взаимодействий пылевых кластеров и первичных твердых тел и их роль в ранней эволюции протопланетного диска. Эволюция орбитальной, вращательной и столкновительной динамики планетезималей.	ГЕОХИ РАН	Маров М.Я.
	Тема 1.1.5. Космогонические проблемы исследований галактических космических лучей	ГЕОХИ РАН	Алексеев В.А.
	Тема 1.1.6. Образование сложных химических соединений в астрохимии	ИНАСАН	Шематович В.И.
	Тема 1.1.7. Ключевые проблемы исследования внеземного вещества. Проблемы аккреции, дифференциации и эволюции космических тел. Изучение проблемы происхождения ультрарефракторных минералов в протосолнечной туманности и фракционирования элементов. Лабораторное изучение метеоритов, геохронология.	ГЕОХИ РАН	Назаров М.А.
	Тема 1.1.8. Происхождение и ранняя эволюция Солнечной системы, модельная реконструкция. Физика океанических планет (планетанов). Свойства объектов типа Плутино.	ИКИ РАН	Ксанфомалити Л.В.
1.2	ПРОЕКТ 1.2: ЭКЗОПЛАНЕТЫ		
	Тема 1.2.1. Исследование и поиск внесолнечных планет	ГАО РАН	Девяткин А.В.
	Тема 1.2.2. Исследование процессов взаимодействия атмосферы экзопланеты со звездным ветром.	ИНАСАН	Кайгородов П.В.
	Тема 1.2.3. Формирование и динамика систем экзопланет.	ФИАН	Иванов П.Б.
1.3	ПРОЕКТ 1.3: ВОДА И ЛЕТУЧИЕ НА ЛУНЕ И МАРСЕ		
	Тема 1.3.1. Исследования полярных районов вечной мерзлоты Луны на основе данных измерений прибора ЛЕНД	ИКИ РАН	Санин А.Б.
	Тема 1.3.2. Исследования распространенности воды и сезонных изменений Марса приборами ХЕНД на борту КА Марс Одиссей и ДАН на борту Марсианской научной лаборатории.	ИКИ РАН	Литвак М.Л.
	Тема 1.3.3. Построение долгосрочной теории движения Луны	ИПА РАН	Иванова Т.В.
	Проектов 3, Тем 14		

ПРОЕКТ 1.1. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, МОДЕЛЬНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ.

Рук.: проф. А.В. Колесниченко, ИПМ им. М.В. Келдыша, kolesn@keldysh.ru

1. Развитие методов механики фрактальных газопылевых сред с целью математического моделирования эволюции Солнечного протопланетного диска.

В рамках формализма неаддитивной статистики Тсаллиса, предназначенной для моделирования аномальных систем с сильным гравитационным взаимодействием отдельных её частей и фрактальным характером фазового пространства, получены модифицированные критерии гравитационной неустойчивости Джинса и Тумре для астрофизических вращающихся газопылевых космических объектов с фрактальной структурой.

Публикации:

1. Kolesnichenko A. V., Marov M. Ya. Modification of the Jeans Instability Criterion for Fractal_Structure Astrophysical Objects in the Framework of Nonextensive Statistics// Solar System Research, 2014, Vol. 48, No. 5, pp. 354-365.
2. Колесниченко А.В. Модификация в рамках неэкстенсивной статистики Тсаллиса критериев гравитационной неустойчивости астрофизических вращающихся дисков с фрактальной структурой //Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. №55. 32 с.
3. Колесниченко А.В., Маров М.Я. Моделирование процессов образования пылевых фрактальных кластеров как основы рыхлых прото-планетезималей в Солнечном допланетном облаке//Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. №75. 44 с.

2. Моделирование турбулентных течений космической плазмы в Солнечном протопланетном диске на основе разрабатываемых методов описания развитой МГД турбулентности, при учёте аккреции вещества из окружающего пространства и воздействия турбулентного динамо на генерацию магнитного поля.

Рассмотрена модель тонкого диска, учитывающая диссипацию турбулентности за счёт кинематической и магнитной вязкости, непрозрачность космической среды, наличие аккреции из окружающего диск пространства, воздействие турбулентного $\alpha\omega$ -динамо на генерацию магнитного поля, магнитное силовое и энергетическое взаимодействие между диском и его короной и т.п.

Публикации:

1. Колесниченко А.В. Термодинамическая модель сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности космической плазмы//Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша.2014.№ 61. 48 с.

2. Колесниченко А.В. К моделированию сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности аккреционного протопланетного диска//Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. №66. 47 с.

3. Разработка теории вихревого динамо в астрофизическом немагнитном диске с гиротропной турбулентностью (включая процессы самоорганизации), связанного с реализацией инверсного энергетического каскада в зеркально-несимметричной дисковой турбулентности.

Исследована роль вихревой спиральности в появлении обратного энергетического каскада Ричардсона-Колмогорова в трёхмерной спиральной турбулентности вращающегося немагнитного астрофизического диска при больших числах Рейнольдса. Сделан вывод, что по мере всё более надёжного подтверждения в численных экспериментах концепции инверсного каскада энергии в спиральной турбулентности учёт этого эффекта приобретает важную роль при моделировании процессов образования и эволюции энергоёмких когерентных вихревых структур в астрофизическом диске.

Публикации:

1. Колесниченко А.В. К теории инверсного энергетического каскада в зеркально-несимметричной турбулентности немагнитного астрофизического диска//MATHEMATICA MONTISNIGRI. 2014. V. 29. P.11-37.
2. Колесниченко А.В. К теории инверсного каскада энергии в спиральной турбулентности астрофизического немагнитного диска //Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. №70. 36 с.

Доклады:

1. Колесниченко А.В. К теории инверсного энергетического каскада в зеркально-несимметричной турбулентности немагнитного астрофизического диска//Сб. тезисов X Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014). Алушта. 2014. с 284-287.

4. Разработка эволюционных моделей астрофизических аккреционных дисков на основе модифицированных методов моделирования турбулентных течений космических сред и процессов самоорганизации развитых турбулентных течений.

Проведенное исследование посвящено разработке континуальных моделей турбулизированных природных сред, лежащих в основе постановок и численных расчётов задач образования, структуры и эволюции различных астро- и геофизических объектов (в частности, аккреционных дисков). К ним относятся модели разнообразных турбулентных течений многокомпонентных и гетерогенных смесей с учетом процессов диффузии, теплопереда-

чи, вязкости и излучения, модели турбулентных движений в химически активных газах и газовзвесьях с фазовыми превращениями, модели структурированных турбулентных течений однородной жидкости и течений, взаимодействующих с электромагнитным полем. Замыкающие соотношения для турбулентных потоков и сил, описывающие процессы переноса и самоорганизации в стационарно-неравновесном турбулентном хаосе, получены методами расширенной необратимой термодинамики и стохастической теории неравновесных процессов. Рассмотрен современный подход к инвариантному моделированию развитых турбулентных течений сжимаемых многокомпонентных реагирующих газовых смесей, основанный на дифференциальных уравнениях переноса вторых корреляционных моментов пульсирующих термогидродинамических параметров. Развита модель описания газопылевых сред при наличии развитой турбулентности и стохастические модельные подходы (на основе уравнений Фоккера-Планка-Колмогорова) к описанию хаотических процессов и процессов спонтанного структурообразования в гидродинамической турбулентности, как отражение процессов самоорганизации в диссипативных открытых системах. Рассмотрены примеры возникновения упорядоченностей в различных космических объектах и природных средах в процессе их эволюции, с акцентированием внимания на формирование и эволюцию газопылевых аккреционных дисков.

Исполнители: акад. М.Я. Маров, проф. А.В. Колесниченко

Публикации:

- 1.Kolesnichenko A. Vl.,Marov M. Ya. Turbulence and selforganizing: problems modelling of space and environments//Springer. Berlin. 2012. P.657.
- 2.Колесниченко А.В., Кадет В.В. Турбулентность. Проблемы термодинамического моделирования многокомпонентных и электропроводных сред. - М.: Интерконтат. 2013. 296
3. Коллективная монография «Проблемы зарождения и эволюции Биосферы 2: Допланетная стадия развития Солнечной системы. Реконструкция химических и геологических условий на ранней Земле. Теоретические и экспериментальные исследования предбиологических химических систем. События и факторы»/под ред.акад. *Галимова Э.М.* Изд-во URSS:. 2013. 640 с.
- 5. Развитие методов гетерогенной механики фрактальных газопылевых сред с целью математического моделирования эволюции Солнечного протопланетного диска. Разработка с учетом фрактальных представлений о свойствах пылевых кластеров эволюционной модели диска, исследование процессов столкновительного взаи-**

модействия первичных пылевых частиц при различных физических параметрах задачи и условий столкновительной релаксации

В рамках основной проблемы космогонии, связанной с формирования планетезималей в Солнечном протопланетном диске, развита с учетом фрактальных представлений о свойствах пылевых кластеров эволюционная гидродинамическая модель образования и роста рыхлых пылевых агрегатов в аэродисперсной дисковой среде, которая изначально состояла из газа и твёрдых частиц (суб) микронных размеров. Показано, как в процессе кластер-кластерной коагуляции происходит частичное их слияние с образованием крупных фрактальных агрегатов, являющихся основным структурообразующим элементом рыхлых прото-планетезималей, возникающих в результате протекания физико-химических и гидродинамических процессов, сходных с процессами роста фрактальных кластеров. Предложено рассматривать совокупность ажурных пылевых агрегатов, как особый тип сплошной среды – фрактальной среды, для которой существуют точки и области, не заполненные частицами. Гидродинамическое моделирование подобной среды, обладающей нецелой массовой размерностью, предлагается проводить в рамках дробно-интегральной модели (её дифференциальной формы), использующей для учёта фрактальности дробные интегралы, порядок которых определяется фрактальной размерностью дисковой среды.

Исполнители: проф. А.В. Колесниченко, акад. М.Я. Маров

Публикации:

1. Колесниченко А.В., Маров М.Я. К моделированию процесса агрегации пылевых фрактальных кластеров в протопланетном ламинарном диске//Астрон. Вестник. 2013, Т. 47, №. 2, С. 92–111.
2. Колесниченко А.В. К моделированию роста пылевых фрактальных агрегатов в солнечном протопланетном диске//. *Mathematica montisnigrix*. 2012. V. 25. P. 65-93.
3. Kolesnichenko A. V. Marov M. Ya. Modeling of aggregation of fractal dust clusters in a laminar protoplanetary disk // *Solar System Research*. 2013. Volume 47, Issue 2, pp.80-98.

Доклады:

1. Первая конференция по Программе 22 Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы», Москва, ИКИ РАН (3 апреля 2012 г.). Доклад: Маров М.Я. «Формирование и эволюция Солнечной системы (презентация исследований по Программе №22)».

2. The Third Moscow Solar System Symposium Space Research Institute, Moscow, Russia, October 8-12, 2012. Доклад: A.V. Kolesnichenko, M.Ya. Marov. «On the Modeling Aggregation of Dust Fractal Clusters in the Protoplanetary Laminar Disc».
3. Конференция Система Земля-Луна, 7 ноября 2012, Москва. Доклад: Колесниченко А.В., Маров М.Я. «Моделирование Роста Пылевых Фрактальных Агрегатов в Солнечном Протопланетном Диске».
4. Восемнадцатая Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013), проходившая с 22 по 31 мая 2013 года в г. Алушта. Доклад: Колесниченко А.В. «К моделированию роста пылевых фрактальных агрегатов в солнечном протопланетном диске». М.: Изд-во МАИ, 2013. с. 730-732.
- 6. Разработка математических моделей развитой МГД турбулентности, предназначенных для численного решения задач, связанных с исследованием турбулентных течений космической плазмы в аккреционных дисках и в связанных с ними коронах. Построение эволюционной модели Солнечного протопланетного диска, учитывающей диссипацию турбулентности за счёт кинематической и магнитной вязкости, наличие аккреции вещества из окружающего пространства, воздействие турбулентного динамо на генерацию магнитного поля, а также магнитное силовое и энергетическое взаимодействие между диском и его короной.**

В рамках основной проблемы космогонии, связанной с реконструированием эволюции допланетного газопылевого облака, окружавшего прото-Солнце на ранней стадии его существования, получена в приближении одножидкостной магнитной гидродинамики замкнутая система магнитогидродинамических уравнений масштаба среднего движения, предназначенная для моделирования сдвиговых и конвективных турбулентных течений электропроводных сред в присутствии магнитного поля. Эти уравнения предназначены для схематизированных постановок и численного решения специальных задач по взаимосогласованному моделированию мощных турбулентных течений космической плазмы в аккреционных дисках и в связанных с ними коронах, в которых магнитное поле заметно влияет на динамику происходящих астрофизических процессов. С целью наглядного физического истолкования отдельных составляющих энергетического баланса плазмы и поля, получены различные уравнения энергии, позволяющие проследивать возможные переходы энергии из одной формы в другую, в частности, понять механизмы перекачки гравитационной и кинетической энергии среднего движения в магнитную энергию. Предпринятое исследование нацелено, в конечном итоге, на совершенствование ряда ре-

презентативных гидродинамических моделей космических природных турбулизированных сред, включая рождение звёзд из диффузной среды газопылевых облаков, образование аккреционных дисков и последующую аккумуляцию планетных систем. Оно является продолжением стохастико-термодинамического подхода к синергетическому описанию турбулентности астро-геофизических систем, развиваемого авторами в целом цикле работ (см. ниже).

В работе, в частности, проанализировано влияние на формирование структуры диска, как осесимметричного магнитного поля протозвезды, так и крупномасштабного поля, порождаемого механизмом турбулентного динамо. Разработан новый подход к моделированию коэффициентов турбулентного переноса в слабо ионизованном диске, позволяющий учитывать эффекты обратного влияния сгенерированного магнитного поля и процессов конвективного переноса тепла на развитие турбулентности в стратифицированном слое конечной толщины и, тем самым, отойти от широко используемого в астрофизической литературе α -формализма Шакуры и Сюняева. Предложена модель тонкого (но оптически толстого) некеплеровского диска, учитывающая диссипацию турбулентности за счёт кинематической и магнитной вязкости, непрозрачность среды, наличие аккреции из окружающего пространства, воздействие турбулентного $\alpha\omega$ -динамо на генерацию магнитного поля, магнитное силовое и энергетическое взаимодействие между диском и его короной и т.п.

Исполнители; проф. А.В. Колесниченко, акад. М.Я. Маров

Публикации:

1. Kolesnichenko A. Vl., Marov M. Ya. Turbulence and selforganizing: problems modelling of space and environments//Springer. Berlin. 2012. P.657.
2. Колесниченко А.В., Кадет В.В. Турбулентность. Проблемы термодинамического моделирования многокомпонентных и электропроводных сред. - М.: Интерконтат. 2013. 296
3. Колесниченко А.В. К МГД моделированию структуры и эволюции турбулентного аккреционного диска протозвезды. Mathematica montisnigrix. 2012. V. 24. P. 67-89.
4. Колесниченко А.В. Термодинамическое моделирование магнитогидродинамической турбулентности // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 11.
5. Колесниченко А.В. О новом методе замыкания уравнений турбулентного движения сжимаемого теплопроводного газа// Математическое моделирование. 2012. Т.24 № 11. С.113–136.

7. Разработка теории вихревого динамо в астрофизическом немагнитном диске с гиротропной турбулентностью. Исследование влияния гидродинамической спиральности во вращающемся протопланетном диске на образование в нем энергоёмких мезомасштабных когерентных вихревых структур, а также на возникновение эффекта отрицательной турбулентной вязкости, связанной с реализацией обратного энергетического каскада в зеркально-несимметричной дисковой турбулентности.

Рассмотрен механизм образования крупномасштабных вихревых структур в зеркально-несимметричной турбулентности, который ранее не принимался во внимание при моделировании эволюции астрофизического немагнитного диска. Обсуждается роль вихревой спиральности в возникновении инверсного энергетического каскада Ричардсона- Колмогорова и связанный с ним процесс генерации энергоёмких когерентных вихревых образований при больших числах Рейнольдса. Наличие механизма вихревого динамо в спиральной трёхмерной турбулентности, ответственного за перенос турбулентной энергии от мелких вихрей к крупным, требует пересмотра стандартных реологических соотношений для тензора напряжений Рейнольдса и турбулентного потока тепла, а также приводит к эффекту отрицательной вязкости. Сделан вывод, что при наличии в литературе все более надёжного подтверждения (в численных экспериментах) концепции обратного энергетического каскада в трёхмерной спиральной турбулентности, учёт этого эффекта, влияющего на синергетическое структурирование немагнитного космического вещества в астрофизическом диске, необходим при его моделировании.

Исполнитель: проф. А.В. Колесниченко

Публикации:

1. Колесниченко А. В. [К теории вихревого динамо в астрофизическом диске с гиротропной турбулентностью](#)//Матем. Моделирование. 2012. Т.24 № 4. С.31–56.
2. Kolesnichenko A. V., Marov M. Ya. Turbulence and selforganizing: problems modelling of space and environments//Springer. Berlin. 2012. P.657.

Доклады:

1. The Fourth Moscow Solar System Symposium (4M-S3) Space Research Institute, Moscow, Russia, October 14-12, 2013. Доклад: A.V. Kolesnichenko. To theory of vortical dynamo in astrophysical disk with a gyrotropic turbulence.

8. Моделирование взаимодействия лазерной плазмы с испаряющимися в земной атмосфере малыми космическими объектами.

Аннотация

В рамках проблемы борьбы с загрязнением высоких слоёв земной атмосферы рассматривается задача лазерного испарения малых металлических объектов в воздушную среду с противодействием с учетом образования плазмы в испарённом веществе. Разработана математическая модель, описывающая последовательно сменяющиеся процессы испарения и конденсации, вызванные взаимодействием плазмы с поверхностью мишени. Предложен метод численной реализации, основывающийся на методе динамической адаптации. Выполнено моделирование процесса лазерного воздействия, в котором возобновление испарения сопровождается образованием в паре контактного разрыва – плазменно-конденсационного скачка. Обсуждаются результаты для режима воздействия длительностью импульса 20нс и с флюенсом 35Дж/см²

Исполнители: д.ф.-м.н. Мажукин В.И., к.ф.-м.н.Демин М.М.

Публикации:

1.Мажукин В.И., Демин М.М. Моделирование взаимодействия лазерной плазмы с испаряющейся в воздухе металлической мишенью. Препринт № 89 ИПМ им. М.В.Келдыша, 2013.

Доклад:

The Fourth Moscow Solar System Symposium (4M-S3) Space Research Institute, Moscow, Russia, October 14-12, 2013. Доклад: V.I. Mazhukin. Mathematical modeling of pulsed laser impact on small space objects

Тема 1.1.2. Исследование динамической и космогонической эволюции Солнечной и экзопланетных систем.

Рук. д.ф.-м.н. И.И.Шевченко (ГАО РАН).

1. Дан критический обзор и анализ физических и динамических (включая миграционные и резонансные) явлений в планетных системах.

Публикация

М.Я.Маров, И.И.Шевченко «Экзопланеты» // Природа. № 6. С. 3–15. (2014).

Доклад

Семинар «Исследования экзопланет», 27–28 мая 2014 г., ИКИ РАН, Москва.

Доклад (приглашенный): Маров М.Я., Шевченко И.И. «Планеты одиночных и кратных звезд».

2. Построена вековая теория динамики планетезималей в циркумбинарных дисках. Показано, что в случае, если двойная звезда является эксцентрической и ее компоненты имеют неравные массы, то генерируется спиральная волна плотности, охва-

тывающая диск на вековой временной шкале. Выведена формула, описывающая эту спираль.

Публикации

T.V.Demidova, I.I.Shevchenko “Spiral patterns in planetesimal circumbinary disks” // ArXiv: <http://arxiv.org/abs/1407.5493> (2014).

T.V.Demidova, I.I.Shevchenko, Spiral patterns in circumbinary planetesimal disks // In: “Planet Formation and Evolution 2014”. Abstract booklet. Kiel: Kiel University. P. 45 (2014).

Доклад

International Conference “Planet Formation and Evolution 2014”. Kiel, 8–10 September 2014.

Доклад: T.V.Demidova, I.I.Shevchenko, Spiral patterns in circumbinary planetesimal disks.

3. Впервые построена аналитическая теория, описывающая область динамического хаоса вокруг системы двух гравитационно связанных тел (двойной звезды, двойной черной дыры, двойного астероида). Теория предсказывает существование порогового значения отношения масс центральной двойной для возникновения области глобального орбитального хаоса, что подтверждается современными данными наблюдений экзопланетных систем.

Публикация

I.I.Shevchenko “Chaotic zones around gravitating binaries” // Astrophys. J. Принято к печати. (2014). (ArXiv: [1405.3788](https://arxiv.org/abs/1405.3788).)

4. На основе теории обобщенных сепаратрисных отображений предложены новые теоретические критерии для выявления устойчивости или неустойчивости различных планетных конфигураций.

Публикация

I.I.Shevchenko, Resonances in the Solar and exoplanetary systems // In: International Conference “Journées 2014. Recent developments and prospects in ground-based and space astrometry.” Book of Abstracts. P. 14. (2014).

Доклад

International Conference “Journées 2014. Recent developments and prospects in ground-based and space astrometry.” St. Petersburg, 22–24 September 2014. Доклад (приглашенный):

I.I.Shevchenko, Resonances in the Solar and exoplanetary systems.

5. Статистически выявлены предпочтительные резонансные состояния в мультипланетных системах и планетных системах кратных звезд.

Публикация

Е.А.Попова, I.I.Shevchenko, Orbital resonances in exoplanetary systems // J. Phys. A Conf. Series. Принято к печати. (2014).

Доклад

Семинар «Исследования экзопланет», 27–28 мая 2014 г., ИКИ РАН, Москва.

Доклад: Е.А.Попова, И.И.Шевченко «Резонансы в мультипланетных системах и планетных системах кратных звезд».

6. Для циркумбинарных экзопланетных систем Кеплер-38, Кеплер-47 и РН1 построены и проанализированы диаграммы устойчивости на плоскости начальных условий «перигелийное расстояние — эксцентриситет». Отождествлены занятые планетами резонансные ячейки.

Публикации

Е.А.Попова, Diagrams of stability of circumbinary planetary systems // In: “Complex Planetary Systems” Proc. IAU, IAU Symp., Vol. 310. Eds. Z. Knežević and A. Lemaître. Cambridge: Cambridge Univ. Press. Принято к печати. (2014).

Е.А.Попова, Diagrams of stability of circumbinary planetary systems // In: International Conference “Journées 2014. Recent developments and prospects in ground-based and space astrometry.” Book of Abstracts. Saint Petersburg: Pulkovo. P. 19. (2014).

Е.А.Попова, Диаграммы устойчивости циркумбинарных планетных систем // Тезисы докладов V Пулковской молодежной астрономической конференции. Санкт-Петербург: Пулково. С. 31–32. (2014).

Е.А.Попова, Диаграммы устойчивости циркумбинарных планетных систем // Тезисы докладов Российской молодежной конференции по физике и астрономии «ФизикА.СПб». Санкт-Петербург, 2014. С. 40. (2014).

Доклады

IAU Symposium 310 “Complex planetary systems”. Namur, July 7–11, 2014. Доклад: Е.А.Попова, Diagrams of stability of circumbinary planetary systems.

International Conference “Journées 2014. Recent developments and prospects in ground-based and space astrometry.” St. Petersburg, 22–24 September 2014. Доклад: Е.А.Попова, Diagrams of stability of circumbinary planetary systems.

V Пулковская молодежная астрономическая конференция. Санкт-Петербург, 9–11 июня 2014 г. Доклад: Е.А.Попова, Диаграммы устойчивости циркумбинарных планетных систем.

Российская молодежная конференция по физике и астрономии «ФизикА.СПб», 28–30 октября 2014 г. Доклад: Е.А.Попова, Диаграммы устойчивости циркумбинарных планетных систем.

7. Изучена динамика широкой кратной системы α Cen AB + Проксима (ближайших к Солнцу звезд), что имеет важное значение для экзопланетных исследований (поскольку у одной из компонент α Cen AB имеется по меньшей мере одна экзопланета). Показано, что с вероятностью около 90% движение Проксимы относительно двойной α Cen AB является гиперболическим.

Публикация

А.С.Матвиенко, В.В.Орлов «Динамический статус широкой кратной системы α Центавра + Проксима» // Астрофизический бюллетень. Том 69. № 2. С. 218–224. (2014).

8. Посредством вычисления характеристических показателей Ляпунова в задаче о динамике в окрестности синхронного резонанса поступательно-вращательного движения спутника планеты в ходе приливной эволюции найдено, что при определенных значениях параметров задачи в фазовом пространстве вращательного движения существует странный аттрактор. Исследование возможности его существования в динамике реальных спутников планет показало, что странный аттрактор может присутствовать в ходе приливной эволюции вращательного движения седьмого спутника Сатурна — Гипериона, вращение которого в настоящее время является хаотическим.

Публикация

А.В.Мельников «Условия возникновения странных аттракторов во вращательной динамике малых спутников планет» // Космич. исслед. Т. 52. № 6. С. 500–511. (2014).

9. Предложена методика расчета погрешности при численном интегрировании орбит астероидов, сближающихся с Землей. Для избранных астероидов построены численные модели движения путем интегрирования уравнений движения с учетом возмущений от 8 больших планет на временном интервале в 100 000 лет. Для одного из них удалось показать, что регулярный характер орбитальной эволюции объясняется присутствием резонанса Лидова–Козаи на всем интервале интегрирования.

Публикации

Е.А.Смирнов, Е.И.Тимошкова «Сравнительное изучение методов численного прогнозирования движения АСЗ на примере астероида 99942 Апофис» // Космич. исслед. Т. 52. № 2. С. 125–131. (2014).

Е.А.Смирнов, Е.И.Тимошкова «Методика расчета погрешности при численном интегрировании астероидов, сближающихся с Землей» // Тезисы докладов V Пулковской молодежной астрономической конференции. Санкт-Петербург: Пулково. С. 35. (2014).

Доклад

V Пулковская молодежная астрономическая конференция. Санкт-Петербург, 9–11 июня 2014 г. Доклад: Е.А.Смирнов, Е.И.Тимошкова «Методика расчета погрешности при численном интегрировании астероидов, сближающихся с Землей».

10. Исследованы особенности представления гравитационного потенциала шарового сегмента рядом Лапласа.

Публикация

К.В.Холщевников, В.Ш.Шайдулин «О свойствах интегралов от многочлена Лежандра» // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 1. Т. 1 (59). Вып. 1. 55–67. (2014).

Доклад

43-я Международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», Екатеринбург, 3–7 февраля 2014 г. Доклад: В.Ш.Шайдулин «Точность представления геопотенциала и его градиента в околоземном пространстве».

Тема 1.1.3. Торможение, разрушение и захват гиперзвуковых болидов аккреционными дисками планет гигантов, рук. д.х.н. В.А Кронрод

Обсуждается проблема прохождения планетезималей через аккреционные диски Юпитера и Сатурна. Рассматриваются задачи торможения, абляции и разрушения планетезималей в результате взаимодействия с газовой средой диска и их захвата в аккреционный диск. Для решения этих задач определялось распределение плотности газа в дисках Юпитера и Сатурна на поздней стадии аккреции планет. Привлекается новая модель маломассивного диска, которая хорошо отвечает современным космохимическим и физическим ограничениям [Макалкин, Дорофеева, 2014]. Распределение плотности в средней плоскости обоих дисков аппроксимируется степенной зависимостью от радиального расстояния до планеты. Учитываются средние хаотические скорости планетезималей, входящих в сферы Хилла планет гигантов. Из сравнения радиусов сфер Хилла и полутолщины диска планетезималей, рассчитанной по средним наклонам их орбит в протопланетном диске, показана удовлетворительность предположения об изотропном распределении хаотических скоростей тел, входящих в сферы Хилла этих планет, после чего эти тела падают на их протопутниковые диски. Многопараметрическая задача торможения, разрушения и абляции планетезималей решается методами численного моделирования с помощью модифициро-

ванных подходов метеорной физики. Уравнения движения и уноса массы в результате абляции записывались в виде [Стулов и др., 1995] Задача разрушения планетезимали при прохождении диска от аэродинамических нагрузок решается в рамках известных моделей разрушения метеорита при вхождении в атмосферу.

Определены ограничения на скорости планетезималей, при которых они остаются в аккреционном диске планеты в результате ее торможения газом диска. Проведено моделирование совместных процессов торможения, абляции и фрагментации планетезималей (вещество кометы) в газовой среде аккреционных дисков Юпитера и Сатурна. Определен максимальный радиус планетезималей, захваченных в дисках на различных расстояниях от планеты. Определен максимальный радиус планетезималей (материал кометы), захваченных в дисках на различных расстояниях от планеты. В области Каллисто фрагментируются тела с размерами больше 100 м. Без учета фрагментации на расстояниях Каллисто остаются в диске тела с $r < 30$ м, на расстояниях Ганимеда - $r < 100$ м. С учетом процессов фрагментации на расстояниях Ганимеда захватываются тела всех размеров в пределах ограничений нашей модели, не учитывающей увеличение эффективного предела прочности планетезималей размерами более 50 км [Slyuta, Voropaev, 1997]. Более узкий спектр размеров захватываемых тел с учетом их фрагментации, а также, обусловленная более удаленным расположением спутника, большая длительность его образования могли обеспечить низкую дифференциацию Каллисто по сравнению с Ганимедом.

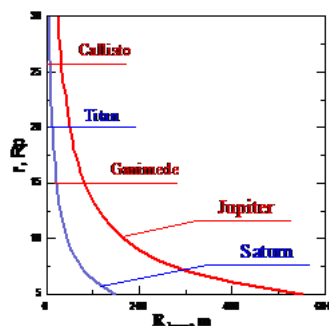


Рис. 1

Торможение и абляция планетезималей (вещество кометы) в аккреционных дисках Юпитера и Сатурна. Планетезимали с радиусом, меньшим R_{max} , остаются в диске.

Публикации и конференции

Кронрод В.А., Кусков О.Л., Дунаева А.Н., Макалкин А.Б. Торможение, захват планетезималей в аккреционных дисках планет-гигантов и строение ледяных спутников. // XV Международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле", 2014, Москва

Kronrod V.A., Makalkin A.B. Gas drag and capture of planetesimals in accretion disks of Jupiter and Saturn with account of ablation and fragmentation. // The Fifth Moscow Solar System Symposium (5M-S³), 2014, Moscow

Кронрод В.А., Кусков О.Л., Дунаева А.Н., Макалкин А.Б. Торможение, захват планетезималей в аккреционных дисках планет-гигантов и строение ледяных спутников. // Пятнадцатая международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в Науках о Земле". Москва, 29 сентября - 1 октября 2014г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2014. – 256 с., 2014, Москва, стр.111-114.

Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Отношение H₂O (лед, вода)/порода в моделях Титана с каменно-ледяной и гидросиликатной мантией // "Экспериментальная геохимия" 2014. Т.2 стр. 39-44

Руководитель темы д.х.н. Кронрод В.А. ГЕОХИ РАН. va_kronrod@mail.ru

1.1.4. Исследование столкновительных взаимодействий пылевых кластеров и первичных твердых тел и их роль в ранней эволюции протопланетного диска.

Научный руководитель: академик РАН М.Я. Маров. Исполнители: А.В. Колесниченко, С.И. Ипатов, А.В. Русол, А.Б. Макалкин, И.Н. Зиглина.

Развита модель эволюции разреженных пылевых кластеров в газопылевом протопланетном диске, являющихся локальными дискретными центрами уплотнения и обладающих фрактальными свойствами, как основы зародышей протопланетезималей. На основе модифицированного кинетического уравнения с использованием формализма деформированной статистики Тсаллиса выведены обобщённые гидродинамические уравнения Эйлера и получен модифицированный критерий гравитационной неустойчивости дисковой среды с фрактальной структурой, обладающей нецелой массовой размерностью и использующей для учёта фрактальности дробные интегралы.

Для модели турбулентного пылегазового субдиска определены длины волн возмущений плотности, при которых возможно возникновение гравитационной неустойчивости в областях формирования Земли, Юпитера и Сатурна. Рассчитаны характерные значения масс и радиусов самогравитирующих пылевых сгущений, оценены средние расстояния между сгущениями, радиусы их сфер Хилла, продолжительность образования сгущений и характерные времена до превращения в планетезимали (~100 км в зоне Земли и ~500 км в зонах Юпитера и Сатурна).

Проведено численное моделирование процесса формирования и эволюции рыхлых пылевых кластеров, обладающих сложной фрактальной структурой, с учетом сил взаимодей-

ствия между пылевыми частицами, кластерами и молекулярными агрегатами, а для систем многих частиц - потенциалов взаимодействия. Проведены серии вычислительных экспериментов по формированию и скорости изменения структур пылевых фрактальных кластеров при столкновениях в газопылевом сгущении, исследованы их реологические характеристики.

Проведены исследования формирования спутниковых систем транснептуновых объектов, исходя из модели двух сталкивающихся разреженных сгущений, и получены ограничения на величину углового момента. Показано, что образовавшееся при столкновении новое сгущение с массой, соответствующей массе твердого тела диаметром $d > 100$ км, может приобрести момент количества движения, необходимый для образования спутниковой системы. Гипотеза об образовании спутниковых систем у планет при столкновении сгущений может быть применима к формированию системы Земля-Луна. Приведены оценки, согласно которым для получения такого же момента количества движения, как у системы Земля-Луна, достаточно столкновения двух одинаковых сгущений размером со сферу Хилла и общей массой в 0.1 массы Земли.

Публикации:

Marov M.Ya., Rusol A.V. Gas-Dust Protoplanetary Disc: Modeling Collisional Interaction of Primordial Bodies. *Journal of Modern Physics*, 2014 (in press).

Колесниченко А.В., Маров М.Я. Модификация в рамках неэкстенсивной статистики Тсаллиса критериев гравитационной неустойчивости астрофизических вращающихся дисков с фрактальной структурой // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 2014, 48, №. 5, 354-365. (Англ. версия: Kolesnichenko A. V., Marov M. Ya. Modification of the Jeans Instability Criterion for Fractal_Structure Astrophysical Objects in the Framework of Nonextensive Statistics// *Solar System Research*, 2014, 48, No. 5, pp. 354-365.).

Колесниченко А.В., Маров М.Я. Моделирование процессов образования пылевых фрактальных кластеров как основы рыхлых прото-планетезималей в Солнечном допланетном облаке// *Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2014. №75. 44 с.

Колесниченко А.В. Термодинамическая модель сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности космической плазмы// *Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2014. № 61. 48 с.

Колесниченко А.В. К моделированию сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности аккреционного протопланетного диска// *Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2014. №66. 47 с.

Колесниченко А.В., Маров М.Я. Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2014. 632 с.

Колесниченко А.В. Термодинамическая модель сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности космической плазмы//Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша, 2014. № 1. 48 с.

Макалкин А.Б., Зиглина И.Н. Характерные времена образования и массы первичных пылевых сгущений и планетезималей в областях формирования Земли, Юпитера и Сатурна. Экспериментальная геохимия, 2014. Т.1. №1. с. 94-98.

Ipatov S.I., Horne K., Models of sky brightness, Abstract # 1390 submitted at the 45th Lunar and Planetary Science Conference (March 17-21, 2014, The Woodlands, Texas).

Ipatov S.I., Abstract submitted at the Asteroids, Comets, Meteors conference, June 30–July 4, 2014, Helsinki, Finland.

Ipatov S.I. Paper, submitted to ICARUS, 2014.

Тема 1.1.5.. Космогонические проблемы исследований ГКЛ.

Руководители: В.А. Алексеев, AVAL37@mail.ru; Г.К. Устинова, ustinova@dubna.net.ru.
ГЕОХИ РАН

1. Найдены долгопериодические вариации интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) в течение последнего миллиарда лет.

Для установления возможных вариаций интенсивности ГКЛ за последний млрд. лет выполнен анализ распределения ~80 значений радиационных возрастов железных метеоритов. Влияние вариаций интенсивности ГКЛ на распределение возрастов было определено путём численного моделирования с привлечением совокупности возрастов, случайно распределённых в интервале 0 – 1000 млн. лет. Установлено, что для вариаций с периодом $t = 450$ млн. лет распределение радиационных возрастов модельной совокупности подобно таковому, найденному для железных метеоритов. Полученные данные свидетельствуют о существовании вариаций интенсивности ГКЛ с периодом $\sim 450 \pm 50$ млн. лет в течение последнего млрд. лет. Вариации могут быть обусловлены периодическим пересечением Солнечной системой спиральных рукавов Галактики. Обсуждаемые в работах [Shaviv, 2002 и др.] изменения интенсивности ГКЛ с периодом ~150 млн. лет представляются менее определёнными. (В.А. Алексеев)

2. Разработан количественный метод оценки изотопных аномалий в условиях переработки первичного вещества ударными волнами в ранней Солнечной системе.

Изотопные аномалии первичного вещества являются суммарным результатом множества процессов его эволюции, поэтому основной проблемой при разделении и изучении этих процессов является количественная оценка их вклада в изотопные аномалии. Выявленные

нами фундаментальные свойства реакций расщепления в ударных волнах в ранней Солнечной системе позволяют выполнить количественный расчет изотопных аномалий, формируемых в этом процессе, и указать на его определяющую роль для изотопных аномалий вымерших радионуклидов, легких элементов и благородных газов. В то же время, расчет аномалии D/H при разной жесткости спектра первичных ускоренных частиц, хотя и повышает величину этого отношения на три порядка величины, по сравнению с реакциями расщепления в современных радиационных условиях, все же его максимальное значение сравнимо лишь с его значением в эволюционирующих звездах FO Ib, что является пренебрежимо малым, в сравнении с наблюдаемым диапазоном D/H в Солнечной системе. Из этого следует, что наблюдаемые аномалии D/H в разных объектах Солнечной системы сформировались уже более поздними процессами, например, теми же реакциями расщепления на стадии жесткого облучения молодого Солнца, и главное, разнообразными многостадийными кинетическими процессами химического и физического фракционирования.

(Г.К. Устинова)

Публикации: 1. Alexeev V., Laubenstein M., Povinec P., Ustinova G. Cosmogenic radionuclides in the Kosice H5 and Chelyabinsk LL5 chondrites and cosmic ray modulation // Meteoritics and Planetary Science. 2014. Vol. 49 (s1). #5016. 2. Alexeev V., Laubenstein M., Povinec P., Ustinova G. Cosmogenic radionuclides in the Kosice H5 and Chelyabinsk LL5 chondrites and cosmic ray modulation // e-poster. DOI: 10.13140/2.1.4268.4805 Conference: 77th Annual Meeting Meteorite Society, September 7-12, 2014, Casablanca. 3. Alexeev V.A. Some features of distributions of extraterrestrial chromite grains in Ordovician limestone of the different regions of the world // In: Lunar and Planetary Science XLV. Houston. March 17-21, 2014. # 1005.pdf 4. Ustinova G. K. Isotopic Relations in Different Reservoirs of Condensation of the Primordial Matter // In: Lunar and Planetary Science XLV. Houston. March 17-21, 2014. # 1443.pdf 5. Алексеев В.А. К вопросу о временных вариациях интенсивности галактических космических лучей за последний миллиард лет: Моделирование распределений радиационных возрастов железных метеоритов // Экспериментальная геохимия. 2014. Т. 2. № 1. С. 5-9 6. Алексеев В.А. Временные вариации интенсивности галактических космических лучей по данным о радиационных возрастах железных метеоритов // Материалы XV Межд. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», 29 сент. - 1 окт. 2014 г., Москва, 2014, с. 16-19. 7. Устинова Г.К. Изотопные соотношения в резервуарах конденсации первичного вещества // Экспериментальная геохимия. Т.2. № 1. С. 115-118.

Тема 1.1.7. Ключевые проблемы исследований внеземного вещества (п. 1.3). Проблемы аккреции, дифференциации и эволюции космических тел (п. 1.4). Изучение проблемы происхождения ультрарефракторных минералов в протосолнечной туманности и фракционирования элементов (п. 1.5). Лабораторное изучение метеоритов, геохронология (п. 1.6)

Впервые изучен СН хондрит NWA 480, содержащий целую коллекцию необычных составляющих от тугоплавких включений до гидратированного вещества типа СМ хондритов. Установлена аэродинамическая деформация некоторых рефракторных включений при их движении в протопланетном облаке. Определены коэффициенты испарения и порядок летучести компонентов из расплавов рефракторных включений. Продолжено изучение метеоритного дождя Челябинск: дана характеристика эффектов ударного метаморфизма, рассчитана ударная адиабата, проанализировано распределение обломков по массе, определен комплекс магнитных характеристик вещества. В лунных метеоритах обнаружены фрагменты идентичные по составу дегидратированному серпентину, что указывает на возможность процессов серпентинизации некоторых типов лунных пород. Определены условия образования элементарного кремния в процессах лунного петрогенезиса. Предполагается, что металлический кремний можно получать в лунных условиях дистилляцией расплавов анортозитовых пород в целях производства солнечных батарей для обеспечения энергией лунных поселений.

Статьи:

Бадюков Д.Д., Дудоров А.Е., Хайбрахманов С.А. Распределение фрагментов Челябинского метеорита по массам. В кн. (сборник статей): "Метеорит Челябинск - год на Земле". 2014. С. 318-327

Безаева Н.С., Бадюков Д.Д., Назаров М.А., Рошетт П., Фейнберг Дж. Магнитные свойства метеорита Челябинск: предварительные результаты. . В кн. (сборник статей): "Метеорит Челябинск - год на Земле". 2014. С. 328-338.

Демидова С.И., Назаров М.А., Аносова О.М., Костицын Ю.А., Нтафлос Т., Брандштеттер Ф. U-Pb датирование циркона лунного метеорита Dhofar 1442 // Петрология. 2014. Т. 22. №1. С. 1-17.

Тезисы докладов:

Demidova S. I., Nazarov M. A., Brandstätter F., Ntaflos Th. Mineralogical evidence for the activity of lunar water // 45th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2014. #1087.

Ivanova M.A., Lorenz C.A., Korochantsev A.V., Zaitsev M.A., Gerasimov M.V. 2014. A large dark inclusion in the Efremovka meteorite // 45th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2014. #1014.

Ivanova M.A., Lorenz C.A., Krot A.N., G.J. MacPherson and M. Bizzarro. Plastically deformed igneous calcium-aluminum-rich inclusions from CV carbonaceous chondrites: clues to a nature of CAI melting events. // 45th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2014. #2166.

Nazarov M. A., Demidova S. I., Ntaflos Th., Brandstaetter F. Origin of native silicon and Fe silicides in lunar rocks // 45th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2014. #1090.

Руководитель: Назаров Михаил Александрович, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, nazarov@geokhi.ru, minazarov@yandex.ru

Тема 1.1.8. Происхождение и ранняя эволюция Солнечной системы, модельная реконструкция. Физика океанических планет (планетанов). Свойства объектов типа Плуттино.

1. В поисках возможных планетанов в рамках настоящей работы проводились астрономические наблюдения в Крымской астрофизической обсерватории. Избранным методом исследований была поляриметрия, как возможный метод детектирования «хвостов» у низкоорбитальных экзопланет. Продолжалось поляриметрическое исследование звезды 51 Peg и звезды HD18803, обладающей очень малой поляризацией. Ни для одного из параметров Стокса периодичности, как в отдельных полосах, так и при усреднении, не обнаружено, как и периодических компонентов, имеющих уровень значимости более 95%. В работе предложен новый удобный метод оценки физических свойств на планетанах, основанный на использовании диаграммы <Энтропия-Энтальпия>. В поисках новых планетанов существование экзопланеты GL 581g в литературе было поставлено под сомнение, хотя авторы открытия с критикой не соглашались. Таким образом, основным кандидатом в планетаны остается GJ 1214b. Свойства излучения, достигающего поверхности планетанов (океанических планет), при заданных звездной постоянной излучения и орбитальных данных экзопланеты, критически зависят от ее альбедо и состава. Глубину океана океанических планет, вместе с другими характеристиками, определяет, главным образом эндогенный тепловой поток. При критических данных для воды (647 К, 22 МПа) экзопланета GJ 1214b может быть планетаном при сферическом альбедо > 0.6 . Спектр освещенности, учитывая характеристики звезды, при этом соответствует освещенности от галогенной лампы накаливания (но с глубокими полосами поглощения от водяного пара). Для альбедо < 0.5 освещенность у поверхности GJ 1214b в оптическом диапазоне вообще была бы близка к нулю.

2. Термодинамическое равновесие отсутствует на планетах земной группы, они характеризуются квазистационарным состоянием, обеспечивающим стабильный температурный

баланс. Какие механизмы поддерживают фотосинтез, жизнь на планете и вызывают мощные диссипативные процессы? Обычный ответ - это солнечная энергия. Но точно такое же количество энергии, как получено от Солнца, Земля излучает в космос в ИК-излучении. Планетарные механизмы, фотосинтез и само существование биосферы обеспечиваются притоком отрицательной энтропии (негэнтропии), который возникает из-за различия между солнечной энтропией и энтропией теплового излучения Земли. Приток негэнтропии на Земле распределяется следующим образом: 70% притока негэнтропии приходится на поддержку теплового состояния планеты, а доля фотосинтеза составляет лишь 0,06%, то есть $7 \cdot 10^{-4} \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$.

3. Спектральный состав излучения, достигающего поверхности планеты Венера, резко отличается от спектра солнечного излучения на Земле. Рассеянная освещенность, как 0.5-7 клк на Венере, была бы нормальна для земного фотосинтеза, даже в глубине густых лесов. Сравнение спектральных кривых радиации для Земли и Венеры показывает, что требования фотосинтеза земного типа к радиации на Венере удовлетворяются в красном и ближнем ИК диапазонах, но радиация 410-450 нм поглощается атмосферой. Гипотетический фотосинтез Венеры располагает только ограниченным с обеих сторон спектральным интервалом 520-910 нм (1.36-2.38 eV) с дополнительной ИК-полосой 980-1025 нм (1.21-1.27 eV). Главными объектами, обнаруженными в 2013 г., стали «стебли растений», которые представляют собой вертикально расположенные тонкие узловатые стволы толщиной 0.3-2 см, высотой 0.2-1 м. Интерес к фотосинтезу предполагаемой аутоτροφной флоры планеты, как источнику существования ее фауны, пояснений не требует. Света для фотосинтеза земного типа там достаточно. Разумеется, фотосинтез при высоких температурах и в безокислительной среде должен опираться на совершенно другие, неизвестные биофизические механизмы.

4. В отличие от «стандартных» земных физических условий, многие экзопланеты могут иметь условия, близкие к венерианским. В рамках проекта продолжалось исследование странных объектов, предположительно, живых, обнаруженных на заново обработанных панорамах аппаратов ВЕНЕРА (1975-82 гг.) Возможные результаты поиска может иллюстрировать новый объект «амисада», обнаруженный в 2013-14 гг.. Высокая плотность гипотетической обитаемости поверхности Венеры, на которую указывают найденные объекты, позволяет предполагать, что в этом отношении поверхность планеты больше похожа на дно земных морских мелководий, чем на земную поверхность. Земная флора начинала свою эволюцию в бескислородной углекислотной атмосфере, по составу вполне соответствующей современной атмосфере Венеры. Если отвлечься от огромной разницы в физи-

ческих условиях и неизвестных особенностей высокотемпературного фотосинтеза, флора Венеры должна быть не менее богатой, чем земная.

Список публикаций за 2014 г.:

1. *Ксанфомалити Л.В.* // ДАН. 2014, том 459, № 2, с. 173–177.
 2. *Ксанфомалити Л.В.* // ДАН. 2014, том 459, № 1, с. 37–40.
 3. *Ксанфомалити Л.В.* // Астрон. вестн. 2014, том 48, № 6, с. 454–457.
 4. *Ксанфомалити Л.В.* // ДАН. 2014, том 458, № 6, с. 647–651.
 5. *Ксанфомалити Л.В.* // Астрон. вестн. 2014. т. 48, №1, с. 1-11.
 6. *Ксанфомалити Л.В.* // Космич. исслед. 2014. т. 52, №6, с. 468-475.
 7. *Ксанфомалити Л.В.* // Нептун / Большая Российская Энциклопедия. Т.22 стр. 482-483.
 8. *Ksanfomality L.V.* // Astrobiology & Outreach. 2014, 2:1 <http://dx.doi.org/10.4172/2332-2519.1000112>.
 9. *Ksanfomality L.V.* // Internat. Lett. Chemistry, Physics and Astronomy. 2014. 3, 64-75. ISSN 2299-3843.
 10. *Ksanfomality L.V.* // EPJ Web of Conferences. 2014. Vol.71, 00072. DOI: 10.1051/epjconf/20147100072.
 11. *Ksanfomality L.V.* // Journal of Global Biosciences 2014, ISSN 2320-1355 Vol. 3(2), pp. 464-472.
 12. *Ksanfomality L.V.* // Journal of Astrobiology. 2014, 1(1): 5-12 DOI: 10.12966/ja.05.02.2014.
 13. *Ksanfomality L.V.* //International Journal of Astronomy and Astrophysics, 2014, Vol.4, pp. 29-38.
 14. *Ksanfomality L.V.* //Advances Zoology & Botany, 2014. 2(2), pp.42-47.DOI: 10.13189/azb.2014.020203
 15. *Ksanfomality L.V.* // Acta Astronautica, 2014. Vol. AA
 16. *Ksanfomality L.V., Selivanov A.S., Gektin Yu.M.* // Global Journal of Science Frontier Research:
(A) Physics and Space Science. 2014, Volume 14, Issue 4, Ver1.0.
- Научный руководитель: д.ф.-м.н. Л.В. Ксанфомалити.

Проект 1.2. Экзопланеты

Тема: 1.2.1. Исследование и поиск внесолнечных планет.

1) В 2014 г. на телескопах Пулковской обсерватории было проведено более 20 успешных наблюдений транзитов экзопланет, а также кандидатов в экзопланеты. На основе прямого транзитного метода и метода тайминга транзитов (TTV method) создаётся и активно раз-

вивается наблюдательная сеть, включающая на данный момент около 30 профессиональных и частных обсерваторий, находящиеся как в северном, так и южном полушариях Земли. На базе этой сети было проведено более 40 наблюдений транзитов кандидатов в экзопланеты и уже обнаруженных экзопланет. Сеть активно развивается, увеличивается число её участников и планируется разработка объединяющего ресурса для созданного международного наблюдательного проекта.

2) На основе наблюдательных данных, полученных на телескопах наблюдательной сети и телескопах Пулковской обсерватории, был проведён частотный анализ ряда экзопланет. Для трёх экзопланет (WASP-4b, Qatar-1b и TrES-5b) было выявлено наличие тайминга в моментах средин транзита, указывающих на возмущение орбиты наблюдаемой экзопланеты со стороны другого объекта, которым может являться новая экзопланета. Для определения возможной массы и орбиты кандидата в экзопланеты был создан пакет программ, проводящий моделирование системы, состоящей из трех тел (звезда – экзопланета – кандидат в экзопланету).

3) В рамках проекта по поиску экзопланет транзитным методом на основе мониторинга одной из площадок на небе, реализованного в Коуровской обсерватории, было выявлено 7 кандидатов в экзопланеты. Коллективные наблюдения в Сети показали, что 3 из них потенциально могут иметь планетную природу, 2 кандидата являются переменными звёздами. Одна из звёзд с потенциальным кандидатом в экзопланеты типа «горячий Юпитер» в 2013 году на телескопе БТА была разделена на 2 звезды (тесная двойная система), но в сентябре 2014 года на БТА с использованием спекл-интерферометрии была обнаружена тройственность данной звёздной системы. Проводится работа по определению возможных размеров потенциального кандидата в экзопланеты

4) Сделаны оценки границ обитаемых зон вокруг звезд из «Пулковской программы наблюдений двойных и кратных звезд» и получены предварительные оценки астрометрического сигнала, зависящего от гравитационного влияния гипотетической планеты. Составлен список избранных двойных звезд, наблюдавшихся в течение нескольких десятков лет с помощью 26-дюймового рефрактора в Пулкове. Эти звезды находятся на расстоянии от 3.5 до 25 парсек от Солнца, принадлежат спектральным классам F, G, K, M и обладают массами от 0.3 до 1.5 масс Солнца. Проведен анализ этих звезд как возможных родительских звезды для экзопланет, в том числе для планет с массой порядка массы Земли. Обнаружение планет земного типа было бы возможно при наблюдениях из космоса с точностью определения положений до 0.3 микросекунд, например, с помощью планируемого европейского астрометрического телескопа NEAT. С учетом полученных по пулковским

наблюдениям динамических параметров и орбитальных элементов этих звезд, вычислены эфемериды положений на ближайшие годы.

3. Список публикаций:

1. Соков Е. Н., «Поиск и исследование экзопланет на основе метода Transit Timing Variations (TTVs). Создание международного наблюдательного проекта по поиску экзопланет методом TTV», Сборник докладов конференции «Физика. СПб-2014», Физ-Тех, 28-30 октября 2014 г. с.45-48.
2. Roman Baluev, Eugene Sokov, Carlos Colazo, Carolina, Matias Schneider, Paul Benni, Eduardo Fernandez, «Improved transit fits and a TTV data release for ten planet-hosting stars from the Exoplanet Transit Database», MNRAS (в печати).
3. Соков Е. Н., «Поиск и исследование экзопланет на основе метода Transit Timing Variations (TTVs). Создание международного наблюдательного проекта по поиску экзопланет методом TTV», Труды V Пулковской Молодёжной астрономической конференции 2014 года (в печати).
4. Artem Burdanov, Eugene Sokov, Kerill Ivanov et al., «Kourovka Planet Search - Discovered Variable Stars and Follow-up of Transiting Exoplanet Candidates From The First Target Field», MNRAS (в печати).
5. N.A.Shakht, L.G.Romanenko, D.L.Gorshanov, O.O.Vasilkova «Dynamic study of possible host stars for extrasolar planetary systems» // Proceedings IAU Symposium No. 310 (2014) «Complex Planetary Systems», p. 104–105.
6. А. Шахт, Л. Г. Романенко, Д. Л. Горшанов, О.О.Василькова Оценки динамических параметров и границ зон обитания избранных звезд Пулковской программы// Астрономический Вестник (в печати).

Руководитель темы: д.ф.-м.н. Девяткин Александр Вячеславович, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН), e-mail: adev@gao.spb.ru.

Тема 1.2.2. Исследование процессов взаимодействия атмосферы экзопланеты со звездным ветром

Как показали газодинамические расчеты, проведенные ранее авторами Проекта, у экзопланет, относящихся к классу «горячих юпитеров», взаимодействующих со звездным ветром могут формироваться газовые оболочки трех видов: замкнутые, квазизамкнутые и открытые. Тип формирующейся оболочки зависит от положения точки лобового столкновения (точки в которой динамическое давление ветра уравнивает давление атмосферы) относительно границ полости Роша. Для планет, атмосферы которых целиком лежат внут-

ри полости Роша, формируется замкнутая оболочка. Если точка лобового столкновения лежит вне полости Роша, то начинается отток вещества атмосферы через точки Лагранжа L_1 и L_2 , при этом могут формироваться квазизамкнутые (если динамическое давление звездного ветра останавливает отток из L_1) и открытые газовые оболочки. В рамках этапа 2014 года на примере типичного «горячего юпитера» HD 209458b для четырех наборов параметров атмосферы определены темпы потери массы оболочками различных типов, формирующихся при этих параметрах. По результатам моделирования были получены следующие оценки: для замкнутых атмосфер $\dot{M} \leq 10^9$ г/с, для квазизамкнутой атмосферы $\dot{M} \approx 3 \cdot 10^9$ г/с, для открытой атмосферы $\dot{M} \approx 3 \cdot 10^{10}$ г/с. При этом в замкнутой и квазизамкнутой атмосферах основной отток вещества происходит через точку Лагранжа L_2 , а для открытой оболочки преимущественно через L_1 .

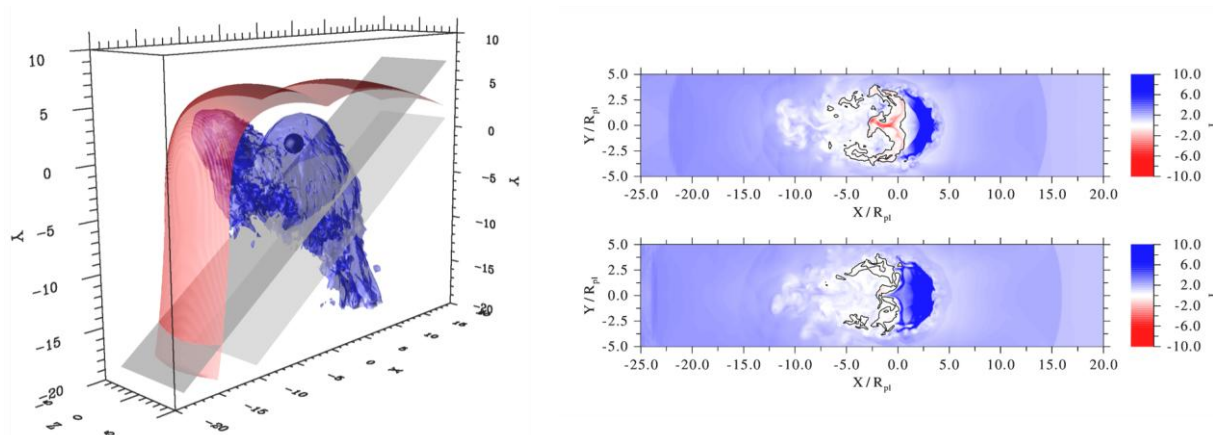


Рис. 1. Квази-замкнутая оболочка. Трехмерное распределение плотности (левая панель) и двумерные распределения потоков (правая панель) через плоскости, показанные на левой панели.

Публикации:

1. D.V. Bisikalo, P.V. Kaygorodov, D.E. Ionov, V.I. Shematovich, «Types of Hot Jupiter Atmospheres», chapter 5, pp. 81-103 // «Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments», Eds. H. Lammer, M. Khodachenko, Springer, ISBN 3319097490, 9783319097497, 2014
2. А.А. Черенков, Д.В. Бисикало, П.В. Кайгородов, «Темпы потери массы экзопланетами типа «горячий юпитер» с газовыми оболочками различных видов» // *Астрономический журнал*, Т. 91, № 10, с. 775–784, 2014

Руководитель темы: Кайгородов Павел Вячеславович, Институт астрономии Российской академии наук, pasha@inasan.ru

Проект 1.3. Вода и летучие на луне и Марсе

Тема 1.3.1.: Исследования полярных районов вечной мерзлоты Луны на основе данных измерений прибора ЛЕНД

Данное исследование использует методы ядерной физики для определения содержания водорода в верхнем приповерхностном слое реголита полярных областей Луны. В работе проверена гипотеза о возможном наличии отложений водяного льда в вечно затененных районах приполярных кратеров и определены периодически освещаемые Солнцем участки поверхности выше 70° , где наблюдается повышенная концентрация водорода в реголите.

Проведен статистический анализ всего объема данных эксперимента ЛЕНД. Построены карты измеренного темпа счета нейтронов над полярными областями Луны и выявлены участки, где наблюдается статистически значимое отклонение потока надтепловых нейтронов от средних значений измеренных в окружающих их территориях.

Произведено численное моделирование темпов счета надтепловых нейтронов прибором ЛЕНД для случаев различной концентрации воды в подповерхностном слое реголита Луны. Анализ результатов моделирования позволил вывести эмпирическую зависимость, связывающую наблюдаемое понижение темпа счета надтепловых нейтронов с содержанием воды в реголите. Найденная зависимость использована для построения карт содержания воды в реголите полярных областей Луны.

Разработан метод выбора районов в околополярных областях Луны, интересных для изучения будущими посадочными космическими аппаратами. Метод основан на совместном анализе данных экспериментов ЛЕНД, ЛОЛА и Дивайнер.

Публикации:

1. Подана на рецензирование в журнал Planetary and Space Science статья Litvak M.L. et al., The variations of neutron component of lunar radiation background from LEND/LRO observations.

Доклады на конференциях:

1. Sanin, A. B. et al., Estimation of Hydrogen Concentration in Lunar South Polar Regions, LPSC-45, No. 1777, p. 1358
2. Livengood, T. A. et al., Neutron Remote-Sensing at the Moon: Modeling the Empirical Variation with Altitude of Neutron Flux for the Lunar Exploration Neutron Detector (LEND), LPSC-45, No. 1777, p. 2592
3. Bodnarik, J. G. et al., LEND CSETN Circular and Elliptical Orbital Data Processing, LPSC-45, No. 1777, p. 2925

4. McClanahan, T. P. et al., Upper-Latitude Hydration of the Moon's Southern Poleward-Facing Slopes, LPSC-45, No. 1777, p. 2931
5. Golovin, D. et al., Variations of Galactic and Solar Cosmic Rays during 2001 – 2014, EGU-2014, id. EGU2014-6960
6. Sanin, A. B. et al., Hydrogen concentration in Lunar South Circumpolar Region according to LEND data, EGU-2014, id. EGU2014-7086
7. McClanahan, T. P. et al., Epithermal Neutrons, Illumination, Spatial Scale and Topography: A Correlative Analysis of Factors Influencing the Detection of Slope Hydration Using LRO's Lunar Exploration Neutron Detector, LEAG-2014, No. 1820, id.3039
8. Livengood, T. A. et al., Diurnally Variable Hydrogen-Bearing Volatiles at the Moon's Equator: Evidence, Concentration, Transport, Implications, LEAG-2014, No. 1820, id.3058
9. Mitrofanov, I. G., Mapping of hydrogen distribution in the regolith of lunar polar regions, COSPAR-2014, B0.1-0003-14
10. Sanin, A. B. et al., Mystery of Permanently Shadowed Regions: Moon and Mercury, COSPAR-2014, B0.1-0042-14
11. Djachkova, M, Selecting landing sites for lunar lander missions using spatial analysis, COSPAR-2014, B0.1-0046-14

Руководитель темы: Санин Антон Борисович, к.ф.-м.н., с.н.с. отдел №63 Ядерная планетология Института космических исследований РАН.

Тема: 1.3.2.Исследования распространенности воды и сезонных изменений Марса приборами ХЕНД на борту КА Марс Одиссей и ДАН на борту Марсианской научной лаборатории.

Был проведен анализ измерений прибора ДАН на специально выбранных участках поверхности Марса вдоль траектории движения марсохода Curiosity. В качестве основной цели исследования рассматривалось сравнение измерений содержания воды и хлора в марсианском грунте сделанных прибором ДАН с данными других научных инструментов поиск корреляций с геологическими особенностями местности, обнаруженных по данным орбитальных и наземных наблюдений (заявлялась как основная цель работ третьего года проекта). Объектом исследования были выбраны два района (Yellowknife Bay и The Kimberley) на удалении соответственно около 1 и 8 км от места посадки. В этих областях проводились контактные исследования включавшие детальное изучение окружающей местности, проведение бурения марсианского грунта с последующим забором и анализом образцов грунта. Эти области были выбраны исходя из геологического разнообразия при-

легающих территории присутствия следов активных гидрологических и геохимических процессов происходивших здесь в прошлом и существенно повлиявших на рельеф местности, структуру грунта и состав геологических пород. Для каждого из этих участков соответствующих различным геологическим образованиям были проведены измерения ДАН для оценки содержания воды и хлора и выполнено сравнение с данными анализа проб грунта по присутствию связанной воды (газовый хроматограф и масс спектрометр SAM, установленный на борту марсохода) и данными измерений поверхностного содержания хлора в местах бурения (инструмент APXS). Кроме этого была изучена корреляция измерений ДАН при переходе от одного геологического образования к другому.

Было показано, что массовые оценки ДАН (1-3% по содержанию воды и 1-2% по содержанию хлора) выполненные по большой толще материала грунта (1.5м x 1.5м x 0.5м) вокруг марсохода в многих случаях достаточно хорошо соответствуют локальным измерениям воды в пробах грунта (взятых с глубины около 8 см) и поверхностным измерениям содержания хлора (размер исследуемых областей не более 10 см²). Кроме этого, по данным прибора ДАН, было показано, что содержание воды и хлора может существенно меняться между разными геологическими районами.

Основные Публикации:

- 1) M.L. Litvak, I.G. Mitrofanov, и др., Local Variations of Bulk Hydrogen and Chlorine Content Measured at the Contact Between the Sheepbed and Gillespie Lake Units in Yellowknife Bay, Gale Crater, Using the DAN Instrument Onboard Curiosity. JGR, 10.1002/2013JE004556, 2014
- 2) M.L. Litvak и др., Joint analysis of subsurface water/chlorine distribution based on comparison DAN/MSL data with other instruments observations onboard Curiosity rover, 40th COSPAR scientific assembly, Moscow, 2014.
- 3) M.L. Litvak и др. Joint analysis of bulk water/chlorine distribution in the martian subsurface along MSL Curiosity traverse from comparison between DAN/MSL and other instruments observations onboard Curiosity rover, AGU, San-Francisco, 2014.

Руководитель проекта: д.ф-м.н. М.Л. Литвак, ИКИ РАН, litvak@mx.iki.rssi.ru

Тема 1.3.3. Построение долгосрочной теории движения Луны

Целью данной работы является практическая реализация построения тригонометрической теории вращения Луны без фиктивных вековых членов в рамках общей планетной теории. Эта теория основывается на разделении быстрых и медленных угловых переменных как в уравнениях движения больших планет и Луны, так и в уравнениях вращения Луны. При

этом объединенная система уравнений движения больших планет и Луны и уравнений вращения Луны сводится с помощью ряда нормализующих преобразований переменных к автономной вековой системе, решение которой можно получить в тригонометрической форме. В качестве переменных, характеризующих вращение Луны, как правило, берутся параметры, непосредственно связанные с углами Эйлера. В настоящей работе используются малые отклонения этих параметров от их некоторых номинальных значений, что повышает практическую эффективность методики общей планетной теории. Получены основные члены разложений параметров вращения в чисто аналитическом виде относительно малых параметров, характеризующих форму Луны, и в тригонометрическом виде относительно времени. Все аналитические вычисления выполнены с помощью эшелонированного пуассоновского процессора.

Список публикаций

1. Taking into account the planetary perturbations in the Moon's theory // Proceedings of Journees 2011 "Systemes de reference spatio-temporels. Earth rotation, reference systems and celestial mechanics: synergies of geodesy and astronomy", (eds. H.Shuch, S.Bohm, T.Nilsson and N. Capitaine), Vienna, Austria, 209–212, 2011.
2. Т.В. Иванова. "Построение вековой системы в аналитической теории движения Луны". Астрон. вестн., Т. 47, №.4, 2013.
3. T.V. Ivanova. "On solution of secular system in the analytical Moon's theory". Proceedings of Journees 2011 "Systemes de reference spatio-temporels. Scientific developments from highly accurate space-time reference", Paris, France, 2014.
4. В. А. Брумберг, Т. В. Иванова. "О практическом построении тригонометрической теории вращения Земли". Труды Института прикладной астрономии РАН, вып. 31, 2014, (в печати).
5. Victor A. Brumberg and Tamara V. Ivanova. 2014. "A supplementary note on constructing the general Earth's rotation theory". Proceedings IAU Symposium "Complex Planetary Systems", No. 310, 2014, (eds. Z. Knezevic and A. Lemaître).

Рук. темы Т. В. Иванова, Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург,
e-mail: itv@ipa.nw.ru