

## НАПРАВЛЕНИЕ 5. АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТ ПЛАНЕТ

Координаторы: О.И. Кораблев (ИКИ), В.И. Шематович (ИНАСАН)

5.1	Проект 5.1: Моделирование УФ свечений атомов водорода и кислорода в планетных коронах с учетом надтепловых характеристик среды	ИНАСАН	Шематович В.И., Кайгородов П.В.
5.2	Проект 5.2: Газовые эмиссии из земной коры как важный фактор взаимодействия литосферы и атмосферы (2.5. е)	ИКИ РАН	Пулинец С.А.
5.3	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	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	Павлов А.К., Васильев Г.И., Ануфриев Г.С.
5.4	Проект 5.4: Исследование слоистых структур, турбулентности и внутренних волн в атмосферах Земли и планет по данным анализа радиозатменных и зондовых измерений	ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН	Павельев А.Г., Губенко В.Н.
5.5	Проект 5.5: Исследование водяного пара и озона на Марсе по данным надирных наблюдений	ИКИ РАН	Фёдорова А.А.
5.6	Проект 5.6: Климатология надоблачной дымки в атмосфере Венеры	ИКИ РАН	Игнатьев Н.И.
5.7	Проект 5.7: Исследование процессов выноса с поверхности и переноса пустынного аэрозоля в атмосфере Марса и его термических эффектов	ИФА РАН	Чхетиани О.Г., Вигасин А.А.
5.8	Проект 5.8: Динамика мезосферы Венеры	ИКИ РАН	Засова Л.В.
5.9	Проект 5.9: Электрические поля и разряды в атмосферах планет Солнечной системы	ИПФ РАН	Мареев Е.А.

### **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  $O_2^+$ ,  $CO_2^+$ , приводя к потоку убегания около  $3 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и полной скорости потери около  $3 \times 10^{25} \text{ с}^{-1}$  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  $CO_2$ . 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](mailto:shematov@inasan.ru)

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

2 доклада на международных конференциях.

### **ПРОЕКТ 5.2. Газовые эмиссии из земной коры как важный фактор взаимодействия литосферы и атмосферы (ИКИ РАН, Пулинец Сергей Александрович)**

Создана модель эффекта ионизации приземного слоя воздуха радоном с оценкой теплового эффекта и изменения термодинамического баланса атмосферы.

С использованием экспериментальных данных об уровне эманации радона в различных регионах земного шара проведены расчеты теплового эффекта ионизации приземного слоя воздуха. Получены зависимости температуры и влажности для различных начальных условий. Проведена оценка количества выделяемой тепловой энергии в виде скрытой теплоты. Проведена оценка энергетической эффективности эффекта ионизации. Предложен специальный параметр – поправка химического потенциала паров воды, позволяющий с использованием только двух параметров (температуры и влажности окружающего воздуха) производить оценку интенсивности ионизации (эманации радона) в реальном масштабе времени, что может быть использовано в практических приложениях при составлении краткосрочных прогнозов землетрясений.

**Руководитель проекта:** Пулинец Сергей Александрович, ИКИ РАН,  
[pulse1549@gmail.com](mailto:pulse1549@gmail.com)

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

### **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 радиоизотопа  $^{14}\text{C}$  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 ( $^{10}\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$ ) 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  $^{10}\text{Be}$  показал, что важную роль играют процессы резкого ускорения обмена между стратосферой и тропосферой и инжектирования стратосферного  $^{10}\text{Be}$  без значительного общего дополнительного производства  $^{10}\text{Be}$  в событии 775 года. Моделирование показывает, что такое ускорение может быть достигнуто за счет образования большого количества  $\text{NO}_x$  в атмосфере и частичного разрушения озонового слоя в реакциях с ними.

Подготовлена к печати статья с детальными расчетами.

Результаты доложены на: конференции «Солнечные космические лучи: чему нас учат солнечные циклы» г. Дубна, 13-14 февраля 2015 г.

**Руководитель темы:** А.К. Павлов, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, [anatoli.pavlov@mail.ioffe.ru](mailto:anatoli.pavlov@mail.ioffe.ru)

#### **ПРОЕКТ 5.4. Исследование слоистых структур, турбулентности и внутренних волн в атмосферах Земли и планет по данным анализа радиозатменных и зондовых измерений.**

**Тема 5.4.1.** Разработан оригинальный метод определения параметров внутренней гравитационной волны (ВГВ) по результатам анализа индивидуального вертикального профиля температуры, плотности или квадрата частоты Брента-Вяйсяля в атмосфере планеты. Сформулирован и обоснован пороговый критерий идентификации ВГВ, при выполнении которого анализируемые вариации могут рассматриваться как волновые проявления. Применение метода к анализу радиозатменных данных позволило впервые идентифицировать волновые события в атмосферах Земли и планет, реконструировать ключевые характеристики для обнаруженных волн, включая собственную частоту ВГВ,

вертикальные потоки волновой энергии и импульса, которые важны при параметризации эффектов ВГВ в моделях общей циркуляции атмосферы.

**Публикация:** по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

**Тема 5.4.2.** Создано тестовое программное обеспечение для визуализации и первичной обработки радиозондовых измерений температуры и скорости ветра в атмосфере Земли с целью исследования в ней внутренних волн. Разработан метод идентификации волновых событий, определения характеристик и степени насыщения атмосферных волн. По результатам анализа зондовых измерений скорости горизонтального ветра и температуры SPARC (<http://www.sparc.sunysb.edu/>) определены реальные и пороговые амплитуды, степень насыщения и другие характеристики для идентифицированных ВГВ в атмосфере Земли.

**Публикация:** по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

**Тема 5.4.3. Модернизация спутникового радиозатменного зондирования атмосфер и ионосфер Земли и планет.**

Радиозатменное дистанционное зондирование на трассах космический аппарат-Земля в течение последних 50 лет применялось в качестве мощного инструмента для исследования трехмерной структуры атмосфер, ионосфер и поверхностей планет. С 1995 года были начаты эксперименты радиозатменного зондирования атмосферы и ионосферы Земли с помощью стабильных, синхронизированных атомными стандартами частоты, сигналов навигационной системы GPS на трассах навигационный спутник – низкоорбитальные спутники. Результаты экспериментов доказали перспективность и конкурентоспособность радиозатменного метода по сравнению с существующими средствами дистанционного зондирования для изучения вертикальной структуры атмосферы и ионосферы Земли в глобальном масштабе с разрешением по высоте в интервале от 0.1 до 1.0 км. Высокое качество сигналов навигационных систем GPS, ГЛОНАСС и др. требует модернизации радиозатменной технологии, которая может быть применена для зондирования атмосфер и ионосфер Земли и планет.

Связь между вариациями производных по времени от фазы, доплеровской частоты и интенсивности зондирующих радиоволн позволила сформулировать принцип локальности зондирования, расширяющего область применения радиозатменного метода.

- Если положение центра симметрии известно, то полное поглощение на трассе распространения радиоволн определяется на одной частоте с точностью до 0.1 дБ путем

исключения из интенсивности зондирующих радиоволн рефракционного ослабления амплитуды, определяемого по измерениям вариаций фазы.

- Вклады слоистых и нерегулярных структур в радиозатменный сигнал могут быть разделены и параметры слоев и турбулентности могут быть измерены с использованием совместного анализа вариаций амплитуды и фазы на одной частоте.
- При отклонении центра сферической симметрии от центра планеты и отсутствии поглощения могут быть измерены высота, наклон слоев к горизонту, а также горизонтальное смещение ионосферных (атмосферных) слоев от перигея лучевой траектории радиоволн.
- Введен, в дополнение к индексу сцинтилляций  $S_4$ , индекс вариаций рефракционного ослабления  $X_p$ , определяемый по флуктуациям фазы зондирующих радиоволн. Высокая корреляция индекса  $X_p$  с индексом  $S_4$  установлена в дециметровом диапазоне радиоволн на трассах навигационные спутники–низкоорбитальные спутники. Указанные выводы подтверждены результатами анализа экспериментальных данных радиозатменного зондирования с помощью спутников FORMOSAT-3 и CHAMP [Pavelyev et al., 2015; Павельев и др., 2015].

**Публикации:** по данной теме в 2015 году опубликованы 2 статьи.

**Руководители проекта:** Павельев Александр Геннадьевич и Губенко Владимир Николаевич, ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, email: [vngubenko@gmail.com](mailto:vngubenko@gmail.com).

## **ПРОЕКТ 5.5. Исследование водяного пара и озона на Марсе по данным надирных наблюдений.**

### **Тема 5.5.1. Многолетние наблюдения дневного свечения $O_2(a^1\Delta_g)$ в атмосфере Марса по данным СПИКАМ.**

Дневное свечение  $O_2(a^1\Delta_g)$  в полосе 1,27 мкм на Марсе является результатом фотодиссоциации озона УФ излучением. Спектрометр СПИКАМ ИК на борту орбитального аппарата MarsExpress наблюдает свечение кислорода в атмосфере Марса, начиная с 2004 г.. Коллективом были обработаны и проанализированы данные за 6 марсианских лет с конца марсианского года (MY) 26 (начало 2004г.) по конец MY32 (середина 2015 г.). Своего максимального значения ~31 MR свечение достигает в начале северной и южной весны в обоих полушариях. Около экватора в период афелия интенсивность свечения не превышает 5-8 MR за все годы наблюдений. Минимальных значений не более 1-2 MR свечение достигает в южном полушарии летом. Сравнение данных наблюдений с данными модели общей циркуляции GCM и одновременными измерениями количества озона спектрометром СПИКАМ УФ позволило получить

скорость дезактивации возбужденных молекул кислорода при столкновении с  $\text{CO}_2$ ,  $k = 0,73 \times 10^{-20}$  см/молек./сек. Исследование межгодовых вариаций озона по наблюдениям «Марс-Экспресс» затруднено дрейфом местного времени от орбиты к орбите и из года в год для одного и того же сезона. Был разработан алгоритм коррекции измерений свечения за местное время на базе модели общей циркуляции Марса. В результате сезонный цикл  $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$  оказался достаточно стабильным со средними межгодовыми вариациями около 21%, что хорошо согласуется с данными наземных наблюдений (Krasnopolsky, 2013). Наибольшую изменчивость показали средние широты северной и южной весной, что совпадает с сублимацией полярных шапок в обоих полушариях. Южные широты также показывают высокую изменчивость от года к году в летний период ( $L_s = 270-330^\circ$ ), что явно относится к пылевой активности в этот период.

#### **Тема 5.5.2. Восстановление вертикального распределения водяного пара на Марсе в полярных областях по одновременным наблюдениям экспериментов СПИКАМ и ПФС на КА Марс-Экспресс.**

На сегодняшний день измерения водяного пара прибором СПИКАМ за 5 марсианских лет являются самым долгим непрерывным временным рядом наблюдений  $\text{H}_2\text{O}$  на Марсе. Между тем, еще два спектрометра на КА Марс-Экспресс – ОМЕГА и ПФС – проводили измерения воды в атмосфере в разных спектральных диапазонах. До этого года командами приборов были обработаны и опубликованы данные за один или два марсианских года (Fouchet et al., 2007; Maltagliati et al., 2011). Между тем, сравнение одновременных наблюдений в разных полосах поглощения газа несет информацию о его вертикальном распределении, а использование одинаковых входных параметров в процедурах восстановления содержания водяного пара, таких как температурные профили и спектроскопические базы данных, позволит избежать систематических ошибок в определении содержания воды в атмосфере (Korablev et al., 2006). В 2015 году появились первые результаты восстановления водяного пара за марсианские годы 26-30, полученные по данным длинноволнового канала ПФС в полосе 20-30 мкм (Pankine, 2015). Нашим коллективом было проведено сравнение одновременных наблюдений ПФС и СПИКАМ, которое показало существенные расхождения результатов двух приборов в полярных широтах в период сублимации северной полярной шапки. Были выбраны области и соответствующие орбиты для совместного анализа. Ведется работа над адаптацией алгоритмов для одновременного восстановления водяного пара по двум полосам.

**Руководитель проекта:** зав.лаб. к.ф.-м.н. Федорова А.А. ИКИРАН, [fedorova@iki.rssi.ru](mailto:fedorova@iki.rssi.ru)

**Публикации:** по данному проекту в 2015 году опубликованы 2 статьи.

1 доклад на международных конференциях.

## **ПРОЕКТ 5.6. Климатология надоблачной дымки в атмосфере Венеры.**

### **Тема 5.6.1. Климатология надоблачной дымки в атмосфере Венеры по данным лимбовых наблюдений на стороне в эксперименте VIRTIS на КА VenusExpress.**

Излучение, наблюдаемое на ночной стороне Венеры в окнах прозрачности между сильными полосами поглощения углекислого газа, рассеивается облаками Венеры, и таким образом, оказывается возможным восстановление плотности аэрозольных частиц верхней части облачного слоя и надоблачной дымки по лимбовым наблюдениям. Разработан метод восстановления плотности аэрозольных частиц в интервале высот 80-90 км по измерениям в окнах прозрачности 1.1, 1.18, 1.74 и 2.3 мкм. Для всех имеющихся лимбовых сеансов измерений, выполненных картирующим спектрометром VIRTIS на КА VenusExpress (89 сеансов с 44 орбит), усредненных с шагом 5 градусов по широте, восстановлены профили логарифма экстинкции. Величина коэффициента полного ослабления на высоте 85 км находится в  $3\sigma$ -интервале от  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$  км<sup>-1</sup> при средней величине  $\approx 10^{-3}$  км<sup>-1</sup>. Эквивалентная средняя плотность аэрозольных частиц моды 2 на высоте 85 км составляет  $\approx 0.1$  см<sup>-3</sup>, а субмикронных частиц  $\approx 10$  см<sup>-3</sup>, что согласуется с результатами измерений методом солнечных затмений в эксперименте SPICAV/SOIR. Плотность дымки подвержена вариациям ( $\pm$ ) на порядок величины, при этом она снижается в высоких широтах и меньше на утренней стороне, чем на ночной, что объясняется фотохимическим образованием сернокислотной дымки в дневное время. Максимум плотности дымки на 20-22 часах местного времени на широтах 20-50°, что, однако, может быть связано с ограниченным покрытием ночной стороны планеты лимбовыми наблюдениями VenusExpress.

### **Тема 5.6.2. Исследование распределения малых составляющих мезосферы Венеры.**

В 2015 году были проведены исследования содержания двуокиси серы (SO<sub>2</sub>) на ночной стороне Венеры в области высот мезопаузы-криосферы (85-110 км). Исследование проводилось на основе орбитальных измерений УФ спектрометра SPICAV аппарата «Венера-Экспресс» в режиме звездного и солнечного просвечиваний. Набрана полная статистика наблюдений за все время эксперимента – с 2006 по 2014 годы. Получены годовые и широтные вариации содержания SO<sub>2</sub> в области мезопаузы (90-100 км), а также вариации по времени суток на Венере.

Кроме того, по измерениям ИК канала спектрометра SPICAV за те же годы была получена аналогичная статистика свойств аэрозольной дымки над облаками Венеры (высоты 70-90 км). Определены размеры и плотности частиц аэрозоля.

**Руководитель проекта:** с.н.с. к.ф.-м.н. Игнатъев Н.И., ИКИ РАН, [niignatiev@gmail.com](mailto:niignatiev@gmail.com)

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

### **ПРОЕКТ 5.7. Исследование процессов выноса с поверхности и переноса пустынного аэрозоля в атмосфере Марса и его термических эффектов.**

**Тема 5.7.1.** На основе результатов статьи (Курганский М.В., 2014: О вертикальном выносе пыли в конвективно-неустойчивом пограничном слое атмосферы. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 50, № 4, с. 383-389) даны количественные оценки выноса пыли (порядка 10 кг/км<sup>2</sup>/сут.) в марсианскую атмосферу пыльными вихрями, наблюдавшимися в кратере Гусева с ровера “Spirit”. Эти оценки – при одном и том же среднем диаметре вихрей – сопоставлены с традиционными оценками, использующими информацию о концентрации пыли в вихре и вертикальной скорости в нем. Получено качественное согласие между оценками, хотя в среднем наши расчеты дают несколько меньшее значение выноса пыли.

Количественно оценено то, как нагрев пыли за счет поглощения прямой солнечной радиации в марсианских пыльных вихрях влияет на их интенсивность. Показано, что имеющиеся в литературе оценки скорости результирующего нагрева воздуха в вихре в 0.05 К/с позволяют объяснить максимальное значение азимутальной скорости в вихре порядка 40 м/с.

**Руководитель проекта:** Чхетиани Отто Гурамович, заведующий лабораторией, доктор физ.-мат. наук, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, e-мейл:

[ochkheti@rssi.ru](mailto:ochkheti@rssi.ru)

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

**Тема 5.7.2.** Продолжалась обработка результатов полевых исследований по выносу аридного аэрозоля. Результаты исследований предполагается использовать для учета несальтационного подъема аэрозоля в мезомасштабных атмосферных моделях. Проведены тестовые расчеты с моделью WRF-Chem. Адекватный учет процессов подъема пыли требует учета подсеточных масштабов, расчета движений в рамках LESмоделей. Проведены новые экспедиционные измерения выноса аэрозоля и его вертикальных профилей на основе линейки из 5 оптических счетчиков на уровнях 0.25 м, 0.5 м, 1.0 м,



2.0 м, 3.0 м. Проводится сравнение эмпирических профилей с результатами, следующими из теоретических оценок по свободной конвекции (Golitsyn, 1980).

Подготовлена установка для лабораторного эксперимента по исследованию механизмов конвективного подъема пыли.

Проанализированы связи выноса пылевого аэрозоля с параметрами устойчивости пограничного слоя (масштаб Мони́на-Обухова). На основе экспериментальных данных по акустическому зондированию атмосферы в аридных и степных регионах проведено исследование статистических распределений вертикальных конвективных движений и их связи с интенсивностью эмиссии аридных аэрозолей. Проведено сравнение с оценками потоков в марсианских условиях.

**Публикации:** по данной теме в 2015 году публикаций нет.

**Тема 5.7.3.** Для расчета понижения температуры поверхности Марса на разных стадиях развития пылевых бурь и облачности подготовлена модель переноса излучения FastLine-by-LineModel (FLBLM), изначально созданная для расчёта потоков солнечного и теплового излучения в атмосфере Земли.

В модели заложены полинейные (line-by-line) алгоритмы для строгого учета селективного газового поглощения с использованием спектроскопической базы данных HITRAN. В этом состоит ее главное преимущество перед другими моделями переноса излучения, где для расчёта поглощения в атмосфере используются преимущественно параметризации, которые работают быстрее, но дают ошибку ~1% и выше по сравнению с высокоточным полинейным методом.

Модель FLBLM подходит для расчётов потоков излучения на Марсе. Средние марсианские температуры ниже земных, поэтому можно использовать ту же спектроскопическую базу данных. Модели атмосферы Марса выбираются по французской базе данных TheMarsClimateDatabase (<http://www-mars.lmd.jussieu.fr/>). Марсианская атмосфера менее плотная по сравнению с земной и более чем на 95% состоит из углекислого газа, с другими профилями температуры и давления. Наиболее сильные линии CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O и O<sub>3</sub> нужно учитывать в расчёте поглощения атмосферой Марса.

Для учета многократного рассеяния применяется метод Монте-Карло, показавший наиболее оптимальную совместимость с полинейным методом. Это позволяет учитывать пыль в атмосфере Марса на высотах от 0 до 20 км с оптической толщиной 0.2-0.3 в видимом диапазоне и поглощением в тепловом диапазоне длин волн, а также водно-ледяные облака на высотах от 10 до 30 км оптической толщиной до 0.5 в видимом

диапазоне. Проведенные тестовые расчеты для земных условий продемонстрировали неплохое соответствие с реальными данными.

**Руководитель проекта:** Чхетиани Отто Гурамович, заведующий лабораторией, доктор физ.-мат. наук, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, e-мейл:

[ochkheti@rssi.ru](mailto:ochkheti@rssi.ru)

**Тема 5.7.4.** На основе полученных нами методами *abinitio* поверхностей потенциальной энергии и индуцированного дипольного момента выполнены расчеты наблюдаемых для различных молекулярных пар, представляющих интерес для моделирования радиационных и физико-химических процессов в планетных атмосферах.

Использование современных квантово-химических методов позволяет во многих случаях с высокой степенью точности охарактеризовать многомерные поверхности потенциальной энергии и наведенного дипольного момента слабо взаимодействующих атмосферных молекул. Эти характеристики могут быть использованы для расчета различных теплофизических или спектральных свойств газов, зависящих от параметров межмолекулярного взаимодействия. В течение прошедшего года нами был выполнен ряд квантово-химических расчетов *abinitio* для таких молекулярных пар, как, например,  $N_2-N_2$ ,  $CH_4-N_2$ ,  $CH_4-CO_2$ ,  $CH_4-Ar$  и других. Найденные поверхности потенциальной энергии и наведенного дипольного момента для различных молекулярных пар были представлены в аналитическом виде, удобном для дальнейшего использования. Нами были развиты методы расчета таких наблюдаемых величин, как, например, второй вириальный коэффициент, интенсивность рототрансляционных индуцированных спектров, мольная доля димеров и др. Результаты расчета температурной зависимости интенсивности индуцированного спектра для  $CH_4-Ar$ , например, продемонстрировали высокую точность используемого нами неэмпирического подхода. В текущем году в рамках классического приближения нами был разработан метод расчета констант равновесия образования димеров, использующий полные потенциальные поверхности энергии межмолекулярного взаимодействия. С помощью этого метода были рассчитаны высотные профили содержания димеров  $N_2-N_2$ ,  $N_2-H_2$ ,  $CH_4-N_2$ ,  $CH_4-CH_4$ ,  $CH_4-Ar$  в атмосфере Титана. Подготовлена обзорная работа, посвященная оценке вклада высокосимметричных атмосферных молекул в парниковый эффект планетных атмосфер. Выполнена параметризация индуцированного поглощения различных молекулярных пар, представляющих интерес для моделирования палеоклимата Земли и Марса. Для модельной палеоатмосферы Марса, характеризуемой повышенным содержанием

углекислого газа, выполнены расчеты потоков радиации, температуры поверхности и скорости радиационного выхолаживания.

**Руководитель темы:** Вигасин Андрей Алексеевич, д.ф.-м.н., ИФА им. Обухова РАН, внс, 119017 Пыжевский пер. 3, [vigasin@ifaran.ru](mailto:vigasini@ifaran.ru), (495)9593829.

**Публикации:** по данной теме в 2015 году опубликовано 2 статьи и 3 сданы в печать.

### **ПРОЕКТ 5.8. Динамика мезосферы Венеры.**

Венера-15 (1983г.) работала на полярной орбите, и измерения на дневной и ночной стороне в северном полушарии происходили с разницей по времени 1 час, разнесенные на 12 часов по местному времени и 180 град по долготе. Спектр в области 6-40 мкм позволяет зондировать атмосферу от верхней границы среднего облачного слоя 55 км до 95 км.

В результате обработки данных, полученных в разное время разными инструментами и КА (30 лет между Venera-15 и VEX), «изображение» поверхности Венеры наблюдается:

- в изолиниях высоты верхней границы верхнего и среднего облачного слоев (Венера-15),
- в изотермах на высотах от 55 до 95 км (Венера-15),
- на высоте верхней границы облаков в полях ветра, УФ-альбедо, в изолиниях высоты верхней границы облаков (Венера Экспресс).

Достаточно четкие «изображения» деталей рельефа в диапазоне высот 55-95 км (Венера-15) можно связать с гравитационными волнами, генерируемыми ветром при встрече с деталями рельефа. Эта гипотеза может объяснить практически независимый от высоты уровня в атмосфере сдвиг по отношению к рельефу и наложить ограничение на распространение гравитационных волн в нижней атмосфере Венеры. Обнаружено также, что сдвиг, независимый практически от уровня в атмосфере, где он наблюдается, зависит от высоты рельефа поверхности.

Результат получен впервые. Существующие в настоящее время модели общей циркуляции атмосферы Венеры не объясняют наблюдаемых эффектов.

**Руководитель проекта:** зав.лаб. д.ф.-м.н. Л.В.Засова, ИКИ РАН, [zasova@iki.rssi.ru](mailto:zasova@iki.rssi.ru)

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

### **ПРОЕКТ 5.9. Электрические поля и разряды в атмосферах планет Солнечной системы.**

Проведены теоретические исследования и численное моделирование электрических полей и разрядов в атмосферах планет Солнечной системы.

1. Рассмотрены основные критерии формирования и поддержания глобальной электрической цепи (ГЭЦ) в атмосферах планет солнечной системы. Из первых принципов оценен профиль проводимости атмосферы и проанализирована возможность существования ГЭЦ на Марсе.

На основе разработанной авторами радиально-симметричной плазмохимической самосогласованной модели воздействия возмущения электрического поля на состав мезосферы исследовано влияние высотных разрядов в атмосфере Земли на ионный состав. Для оценки развития вклада пылевых бурь в ГЭЦ в атмосферах планет земной группы исследована задача электрификации частиц в соответствующих условиях и получены критерии возникновения турбулентного электрического динамо (ТЭД). Показано, что ТЭД может сыграть существенную роль в динамике электрификации облаков как на начальном этапе, так и зрелой стадии облачного электрификации, с учетом различных механизмов электрификации. Особенно важно, что индуктивное ТЭД способно генерировать большое горизонтальное электрическое поле, которое наблюдается, например, в наковальнях облаков и пылевых бурях.

2. Был проведен мультифрактальный анализ модельной крупномасштабной токовой системы молниевых разрядов с целью построения прогностических моделей и системы адекватного анализа данных спутниковых экспериментов.

Предложена модель возникновения и эволюции компактных внутриоблачных разрядов, являющихся источником коротких биполярных импульсов электрического поля и сверхмощных всплесков высокочастотного излучения в земной атмосфере. Данная модель является универсальной и может быть применена к атмосферам других планет.

**Руководитель проекта:** Е.А. Мареев, ИПФ РАН, [mareev@appl.sci-nnov.ru](mailto:mareev@appl.sci-nnov.ru)

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