

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

Аннотация. 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 CO₂. Воздействие плазмы солнечного ветра сопровождается переносом энергии протонов и атомов водорода с высокими кинетическими энергиями из солнечного ветра в столкновениях с нейтральными частицами верхней атмосферы Марса. Отмечена доминантная роль в диссипации атмосферы данного процесса при солнечных вспышках. Разработанная модель Монте-Карло и полученные с ее помощью оценки скорости диссипации нейтральной атмосферы будут сравнены с характеристиками процессов потери атмосферы Марса, полученными в недавних наблюдениях и измерениях при помощи космического аппарата NASA MAVEN, нацеленного на изучение эволюции атмосферы Марса. Такое сравнение позволит сопоставить результаты моделирования с данными измерений и уточнить разработанные кинетические модели диссипации нейтральной атмосферы Марса.

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

Состав группы: Бисикало Д.В., Ионов Д.Э., Институт астрономии РАН

Публикации:

1. Шематович В.И., Маров М.Я. «О нетепловой диссипации нейтральной верхней атмосферы Марса». Доклады Академии наук, 461, № 6, 660–663, (2015).
2. Бронский В.С., Шилобреева С.Н., Шематович В.И., Хохлов А.В. «Моделирование распыления ледяных поверхностей под воздействием ионов H⁺: перераспределение изотопов H и O в приложении к спутникам Юпитера». Астроном. Вестник, **49**, №4, 273–282, (2015).
3. Soret L., Gérard J.-C., Libert L., Shematovich V.I., Bisikalo D.V., Stiepen A., Bertaux J.-L. «SPICAM observations and modeling of Mars aurorae». Icarus, V. 264, 398–406 (2016).
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)

Аннотация. 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

Состав группы: Пулинец С.А., ИКИ РАН, Давиденко Д.В., ИКИ РАН, Петрухин А.В., студент 6 к. МФТИ.

Публикации:

1. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В., Прогноз землетрясений возможен?! Интегральные технологии многопараметрического мониторинга геоэффективных явлений в рамках комплексной модели взаимосвязей в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли, Москва, Изд. «Тривант», 2014, 144 с.
2. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В., Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера, стимулируемых ионизацией, Геомагнетизм и аэрономия, 55, Вып. 4, 521-538, 2015
3. Ouzounov D., Pulinets S., Davidenko D., Revealing pre-earthquake signatures in atmosphere and ionosphere associated with 2015 M7.8 and M7.3 events in Nepal. Preliminary results, [arXiv:1508.01805](https://arxiv.org/abs/1508.01805) [physics.geo-ph], 2015
4. Liu J.Y., Y.I. Chen, C.C. Huang, Michel Parrot, X.H. Shen, S.A. Pulinets, Q.S. Yang, Y.Y. Ho, A spatial analysis on seismo-ionospheric anomalies observed by DEMETER during the 2008 M8.0 Wenchuan earthquake, Journal of Asian Earth Sciences, [doi:10.1016/j.jseaes.2015.06.012](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.06.012)

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.

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

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

Для проверки гипотезы супервспышки нами впервые проведены расчеты образования долгоживущих радионуклидов (^{14}C , ^{10}Be , ^{36}Cl) в атмосфере Земли и ионизации верхней атмосферы Земли под действием сверхмощных вспышек с использованием двух различных моделей внутриядерного каскада (BIC и BERT). Было продемонстрировано, что, несмотря на существенные различия (1.5-2 раза) в абсолютном производстве изотопов, отношения производств меняются слабо (менее 30%). Результаты расчетов подтвердили полученные ранее выводы, что событие 775 года должно было, в зависимости от «жесткости» спектра, в 20-160 раз превосходить по мощности вспышки 1956 и 1972 года, и полная энергия события должна была составлять $>10^{34}$ эрг. На основе имеющихся данных по содержанию изотопов в кольцах деревьев и кернах льдов Антарктики и Гренландии сделан вывод, что события 775 и 993 года могут быть объяснены только «мягкой» супервспышкой или галактическим гамма-всплеском.

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

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

Состав группы: снс Павлов А.К., снс Васильев Г.И., мнс Вдовина М.А., внс Еремин В.К., нс Крутьков С.Ю.

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. Аннотация. 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.

Данный метод может быть использован при анализе вертикальных профилей, полученных любыми способами, в которых точность позволяет измерять амплитуды малых (~1%) вариаций температуры или плотности в атмосфере. Метод базируется на анализе относительных амплитуд волнового поля температуры или плотности, а также на положении линейной теории ВГВ, согласно которому волновые амплитуды ограничиваются пороговыми значениями, вследствие процессов динамической (сдвиговой) неустойчивости в атмосфере. Применение этого метода к радиозатменным данным дает возможность изучить волновую активность в атмосфере планеты в глобальном масштабе и определить ключевые параметры ВГВ, такие как собственная частота, горизонтальная и вертикальная длина волны, амплитуды горизонтальных и вертикальных возмущений скорости ветра, плотности кинетической, потенциальной и полной энергии, вертикальные потоки волновой энергии и импульса. Результаты

мониторинга волновой активности могут быть полезными при построении численных моделей циркуляции атмосферы, включающих параметризацию волновых эффектов. Для валидации метода нами были использованы результаты анализа одновременных радиозондовых измерений температуры и скорости ветра в стратосфере Земли. Разработанный оригинальный метод анализа волновых явлений в атмосферах планет [Gubenko et al., 2008, 2011; Губенко и др., 2012, 2015] получил признание научного сообщества как в России, так и за рубежом и успешно применяется при исследовании волновых процессов в атмосфере Земли [Horinouchi and Tsuda, *J. Geophys. Res.*, 2009; Xiao and Hu, *GPS Solutions*, 2010; Rechou et al., *Atmos. Chem. Phys.*, 2014; Sacha et al., *Atmos. Meas. Tech.*, 2014] и планет [Altieri et al., *J. Geophys. Res.*, 2014; Peralta et al., *Geophys. Res. Lett.*, 2015].

Публикация:

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г. Характеристики внутренних волн в атмосфере Марса, полученные на основе анализа вертикальных профилей температуры миссии *Mars Global Surveyor* // *Космич. исслед.* 2015. Т. 53. № 2. С. 141–151, doi: 10.7868/S0023420615020028.

Тема 5.4.2. Аннотация. 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.

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) существенно влияют на структуру и циркуляцию атмосферы Земли путем переноса энергии и импульса с нижних ее уровней на верхние. Поскольку ВГВ является характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать в атмосферах Марса и Венеры. Источниками генерации ВГВ в атмосферах планет могут быть тепловые контрасты вблизи поверхности, топография, сдвиговая неустойчивость ветра, конвекция и фронтальные процессы. Наблюдения флуктуаций температуры и скорости ветра в средней атмосфере Земли показали, что волновые амплитуды возрастают с увеличением высоты,

однако недостаточно быстро, чтобы соответствовать их росту из-за экспоненциального уменьшения плотности в отсутствие диссипации энергии. Линейная теория ВГВ объясняет это замедление темпа амплитудного роста следующим образом: превышение волновой амплитудой пороговой величины будет приводить к неустойчивости и возникновению турбулентности, которая препятствует дальнейшему увеличению волновой амплитуды. Полагают, что сдвиговая и конвективная неустойчивости являются теми механизмами, которые вносят наибольший вклад в диссипацию и насыщение ВГВ в атмосфере. Для высокочастотных волн пороговые амплитуды сдвиговой и конвективной неустойчивости примерно одинаковы. Однако для ВГВ с низкими частотами порог сдвиговой неустойчивости существенно ниже его аналога для конвективной неустойчивости. Информация о реальной и пороговой волновой амплитуде важна при определении влияния эффектов ВГВ на невозмущенную атмосферу. Предположение о насыщении внутренних волн играет ключевую роль для радиозатменных исследований ВГВ в атмосферах планет, поэтому изучение процессов насыщения волн в атмосфере Земли с помощью зондов является актуальной задачей. 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 [Gubenko et al., 2015].

Публикация:

V.N. Gubenko, I.A. Kirillovich, A.G. Pavelyev (2015). Radiosonde studies of internal gravity waves and IGW saturation processes in the Earth's atmosphere and their applications to the RO observations of IGWs in the Martian and Venusian atmospheres // Proceedings of International Symposium "Atmospheric Radiation and Dynamics" (ISARD – 2015), 23 – 26 June 2015, Saint-Petersburg, P. 253–255, doi: 10.13140/RG.2.1.4380.2721.

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

Аннотация. 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 S4, индекс вариаций рефракционного ослабления X_p , определяемый по флуктуациям фазы зондирующих радиоволн. Высокая корреляция индекса X_p с индексом S4 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:

1. A.G. Pavelyev, Y.A.Liou, S.S.Matyugov, A.A.Pavelyev, V.N.Gubenko, K.Zhang, and Y.Kuleshov (2015) Application of the locality principle to radio occultation studies of the Earth's atmosphere and ionosphere// Atmos.Meas.Tech. V. 8.No. 7. P. 2885–2899. www.atmos-meas-tech.net/8/2885/2015/, doi:10.5194/amt-8-2885-2015.

2. Павельев А.А., Матюгов С.С., Павельев А.Г. (2015) Модернизация спутникового радиозатменного зондирования атмосфер и ионосфер Земли и планет // МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ «АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА» (МСАРД – 2015) 23 – 26 июня 2015, Санкт–Петербург Петродворец. Тезисы докладов. С. 33–35.

Руководители проекта: Павельев Александр Геннадьевич и Губенко Владимир Николаевич, ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, email: ygubenko@gmail.com.

Состав группы: Павельев А.Г., Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.А., Матюгов С.С.

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 Mars Express наблюдает свечение кислорода в атмосфере Марса, начиная с 2004 г.. Коллективом были обработаны и проанализированы данные за 6 марсианских лет с конца марсианского года (МУ) 26 (начало 2004г.) по конец МУ32 (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 CO_2 , $k = 0,73 \times 10^{-20}$ см/молек./сек. Исследование межгодовых вариаций озона по наблюдением «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 $O_2(a^1\Delta_g)$ 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 H_2O 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. ИКИ РАН, fedorova@iki.rssi.ru

Состав группы: зав.отд. д.ф.-м.н. О.И. Кораблев, гл.спец. Трохимовский А.Ю., м.н.с. Гусякова С.А.

Публикации:

1. Trokhimovskiy, A., A.A. Fedorova, O.I. Korablev, F. Montmessin, J.-L. Bertaux, A. Rodin, M.D. Smith. Mars' water vapor mapping by the SPICAM IR spectrometer: Five martian years of observations, *Icarus*, 251, 50-64, 2015, doi: 10.1016/j.icarus.2014.10.007.

2. Guslyakova S., A. Fedorova, F. Lefevre, O. Korablev, F. Montmessin, A. Trokhimovsky, J.-L. Bertaux, Long-term nadir observations of the O₂ dayglow by SPICAM IR, submitted to Planet. Space Sc. 2015 (благодарность программе 22(9) за 2014).

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 Venus Express.

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 Venus Express (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 σ -интервале от 10⁻⁴ до 10⁻² км⁻¹ при средней величине $\approx 10^{-3}$ км⁻¹. Эквивалентная средняя плотность аэрозольных частиц моды 2 на высоте 85 км составляет ≈ 0.1 см⁻³, а субмикронных частиц ≈ 10 см⁻³, 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 Venus Express.

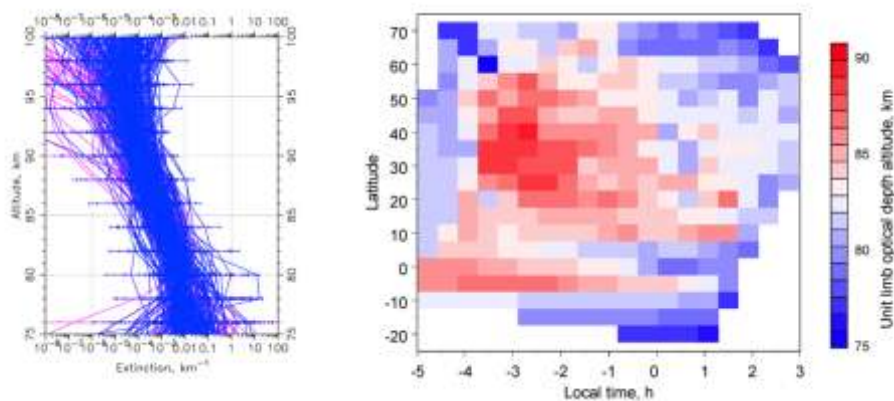


Рисунок 5.6.1. Вертикальные профили экстинкции надоблачной дымки (слева) и высота лимба, т.е. уровня единичной оптической толщины вдоль луча зрения (справа), как функция местного времени и широты.

Тема 5.6.2. Исследование распределения малых составляющих мезосферы Венеры.

В 2015 году были проведены исследования содержания двуокиси серы (SO_2) 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_2 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. Игнатьев Н.И., ИКИ РАН, niignatiev@gmail.com

Состав группы: зав.лаб. д.ф.-м.н Засова Л.В., с.н.с. к.ф.-м.н Беляев Д.А., м.н.с. Горинов, Д.А., асп. Лугинин М.С., асп. Евдокимова Д.Г.

Публикация:

N. Ignatiev, L. Zasova, D. Gorinov. Uppercloudhazeonthenightside of Venus, The Sixth Moscow Solar System Symposium (6M-S3), IKI RAS, 5-9 October 2015, 6MS3-VN-06.

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 $10 \text{ кг/км}^2/\text{сут.}$) 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 .

Результаты были доложены на Генеральной Ассамблее 2015 Европейского союза наук о Земле (EGU2015) в г. Вена, Австрия, 12-17 апреля 2015 г. и вошли в доклад на симпозиуме по пыльным вихрям, который проводился в Международном Институте космических наук (International Space Science Institute, ISSI) в г. Берне, Швейцария, 16-20 февраля 2015 г. В Берне был сделан доклад (Michael Kurgansky. *Dynamical and statistical model ingof dust devils*), в который вошли проведенные автором оценки выноса пыли в марсианскую атмосферу пыльными вихрями, наблюдавшимися в кратере Гусева с ровера “Spirit”.

Сдана в журнал “Space Science Reviews” обзорная статья “*Dust devils teady-state structure from a fluid dynamics perspective*” (авторы Michael V. Kurgansky, Ralph D. Lorenz, Nilton O. Renno, Tetsuya Takemi, Zhaolin Gu, Wei Wei; в настоящее время статья находится в стадии доработки по рецензиям), в которой, в том числе, обсуждается обратное влияние – в первую очередь, термодинамическое и динамическое – поднятой вихрями (в т.ч. марсианскими пыльными вихрями) пыли на их динамику.

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

ochkheti@rssi.ru

Состав группы: Курганский Михаил Васильевич, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, e-мейл: kurgansk@ifaran.ru

Публикация:

1. Michael Kurgansky. *Vertical transport of dust in convective boundary layer*. Geophysical Research Abstracts. Vol. 17, EGU2015-6220, 2015.

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 LES моделей.

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.

Результаты докладывались на 19-й Международной школе-конференции молодых ученых "СОСТАВ АТМОСФЕРЫ. АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ", Шепси, Краснодарский край, 25 – 29 мая 2015 г (Вазаева Н.В., Гледзер Е.Б., Курганский М.В., Лебедев В.А., Обвинцев Ю.И., Чхетиани О.Г. Вынос аридного аэрозоля в условиях слабых ветров).

Публикации:

1.М.С. Артамонова, Д.П. Губанова, М.А. Иорданский, В.А. Лебедев, Л.О. Максименков, В.М. Минашкин, Ю.И. Обвинцев, О.Г. Чхетиани. Вариации приземного аэрозоля в

степной зоне юга России в летний период, Геофизические процессы и биосфера, 2016 (принята в печать).

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 CO₂, CO, H₂O и O₃ 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-мэйл:

ochkheti@rssi.ru

Состав группы: Гинзбург Александр Самуилович, заведующий лабораторией, доктор физ.-мат. наук, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, e-мэйл: gin@ifaran.ru

Фалалеева Виктория Александровна, младший научный сотрудник, e-мэйл:

victory@ifaran.ru

Тема 5.7.4. Аннотация. На основе полученных нами методами *ab initio* 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 *ab initio* для таких молекулярных пар, как, например, N₂-H₂, CH₄-N₂, CH₄-CO₂, CH₄-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 CH₄-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 N₂-N₂, N₂-H₂, CH₄-N₂, CH₄-CH₄, CH₄-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, (495) 959 3829.

Состав группы: Вигасин Андрей Алексеевич, Калугина Юлия Николаевна.

Публикации:

1. Y.N. Kalugina, S.E. Lokshtanov, A.A. Vigasin. *Ab initio* study of the CH₄-Ar potential and induced dipole surfaces: True bound dimer content and collision-induced absorption. Book of abstracts, The 24th Colloquium on High resolution molecular spectroscopy, 24-28 August 2015, Dijon.
2. I.A. Buryak, A.A. Vigasin. Classical calculation of the equilibrium constants for true bound dimers using complete potential energy surface. *Journal of Chemical Physics*, принято в печать.
3. Sameh Nasri, Yosra Ajili, Nejm-Eddine Jaidane, Yulia N. Kalugina, Philippe Halvick, Thierry Stoecklin, and Majdi Hochlaf. Potential energy surface of the CO₂-N₂ van der Waals complex, *Journal of Chemical Physics*, 142, 174301 (2015)
4. Y.N. Kalugina, S.E. Lokshtanov, V.N. Cherepanov, A.A. Vigasin. *Ab initio* 3D potential energy and dipole moment surfaces for the CH₄-Ar complex: Collision-induced intensity and dimer content. *Journal of Chemical Physics*, сдано в печать.
5. А.А. Вигасин, И.И. Мохов. Парниковый эффект планетных атмосфер в связи со свойствами симметрии их молекулярных составляющих, *Изв. РАН, ФАО*, сдано в печать.

ПРОЕКТ 5.8. Динамика мезосферы Венеры.

Аннотация. «Изображение» деталей рельефа поверхности на разных уровнях в мезосфере от 55 до 95 км.

Венера-15 (1983 г.) 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.

Сравнение изолиний различных параметров на разных уровнях в атмосфере с рельефом Венеры (по картам КА Магеллан) показало, что изолинии таких параметров как положение границ верхнего (67 км) и среднего (55 км) облачного слоя, изотермы на высотах от 55 до 95 км повторяют наиболее выраженные детали рельефа (Иштар до 11 км высоты, Бетта Регио, 5 км, низменность Аталанта, 0 км) со сдвигом по долготе около 30 градусов, т.е смещенные по отношению к рельефу на высотах от 55 до 95 на одну и ту же величину около 3000 км, в направлении суперротации. Скорость ветра в среднеширотном ветровом джете в поле термического ветра на высоте 60-65 км коррелирует с рельефом,

так что минимум скорости наблюдается над Иштар, а максимум над Аталанта с разницей до 30м/с, также со смещением по долготе около 30° .

Корреляция с рельефом и сдвиг приблизительно на 30 град по долготе в сторону суперротации (на запад) наблюдается также в поле зонального ветра, полученного по УФ-изображениям камеры VMC, и изолиний высоты верхней границы облаков по данным спектрометра VIRTIS-M на Венере Экспресс.

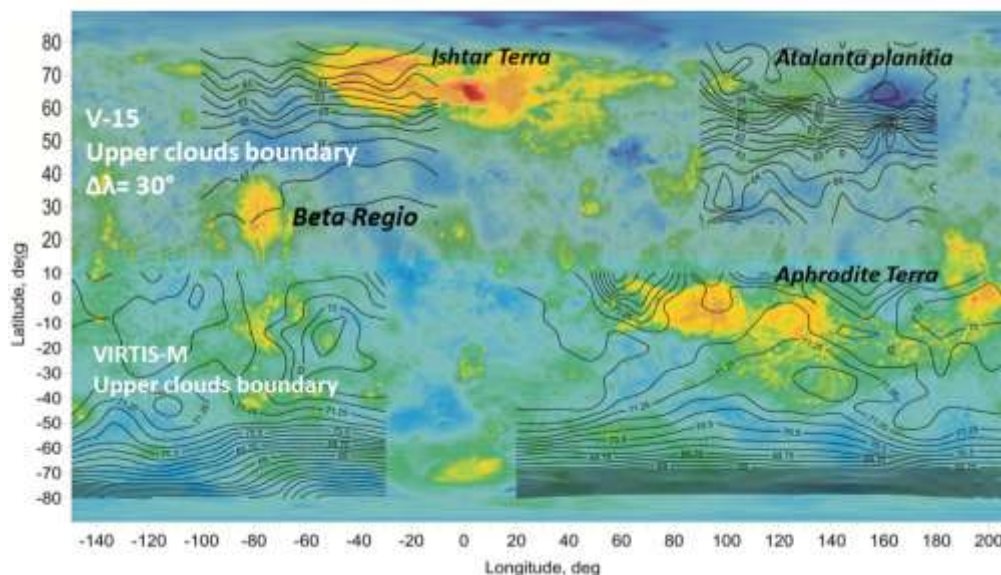


Рис. 1. Изображение деталей рельефа поверхности и изолинии высоты верхней границы облаков (Венера-15 в северном полушарии, VIRTIS– в южном).

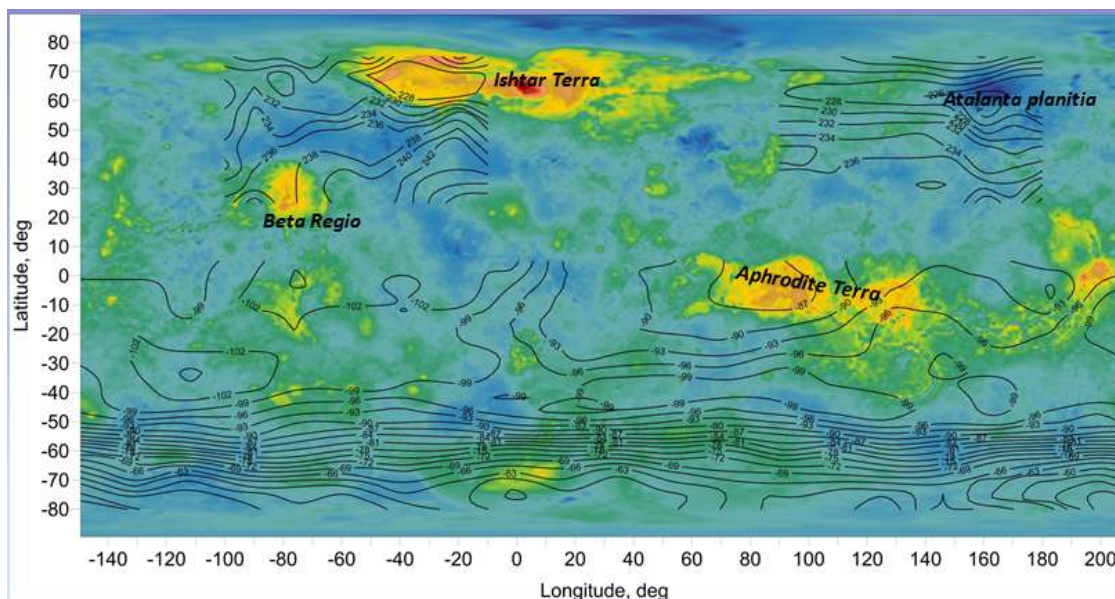


Рис. 2. Температура на уровне верхней границы облаков – изотермы в северном полушарии (Венера-15) и изолинии скоростей зонального ветра, измеренного по УФ–изображениям камеры VMC на Венере Экспресс в южном полушарии, наложены на карту Венеры (Магеллан). Корреляция изолиний и температуры, и ветра с рельефом превышает 90 и 80%, соответственно. Более низкие температуры наблюдаются над более высокими областями (Иштар). Так же, как и в случае Венеры 15, над горами наблюдаются более низкие скорости ветра (20 м/с).

Рассматриваемые данные получены в разное время разными инструментами и КА (30 лет между Venera-15 и VEX). «Изображение» поверхности 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 не зависящий 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

Состав группы: к.ф.-м.н. И.В. Хатунцев, М.В. Пацаева, к.ф.-м.н. Н.И. Игнатьев.

Публикации:

1. L.V. Zasova, I.V. Khatuntsev , M.V. Patsaeva, N.I. Ignatiev, A.V. Rodin, A.V.Turin, W.J. Markiewicz, G. Piccioni, Venus atmosphere and extreme surface topography. EPSC Abstracts, Vol. 10, EPSC2015-876, 2015
2. Zasova L., Khatuntsev I., Patsaeva M., Ignatiev N., Rodin A., Turin A. Influence of the surface topography on Venus atmosphere from VMC and VIRTIS/VEX and FS Venera-15. Абстракт. 6M-S3, Moscow, Russia, October 5-9, 2015
3. M.V. Patsaeva, I.V. Khatuntsev, D.V. Patsaev, D.V. Titov, N.I. Ignatiev, W.J. Markiewicz, A.V. Rodin; The relationship between mesoscale circulation and cloud morphology at the upper cloud level of Venus from VMC/Venus Express; Planetary and Space Science, DOI: 10.1016/j.pss.2015.01.013, Volume 113, p.100-108, 2015.

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

Аннотация. 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. Предложенная модель показывает отсутствие стационарной ГЭЦ на Марсе, при этом возможно протекание тока по цепи при работе мощного и протяженного генератора, например во время масштабной пылевой бури. Определение вклада от нескомпенсированного заряда в областях генерации ЭДС в ионосферный потенциал обладает рядом особенностей и преимуществ. Такая постановка задачи позволяет самосогласованным образом учесть влияние проводимости и дает возможность задать несимметрично распределенный источник, в котором заряды находятся не на одной вертикальной оси. Для атмосферы Марса это особенно актуально по двум причинам: во-первых, атмосфера Марса сильно разрежена, поэтому даже сравнительно небольшие

возмущения плотности заряда вносят существенные поправки. Во-вторых, на Марсе наблюдаются очень мощные и продолжительные пылевые бури, способные изменить профиль проводимости и, тем самым, повлиять на протекание тока от источника в ионосферу.

Было проведено моделирование для двух начальных распределений плотности заряда: две области заряда, разнесенные в пространстве, так, что суммарный заряд равен нулю (типичный конвективный генератор).

Для первого случая, как показали расчеты, при разнесении областей зарядов на расстояние пять и более километров по вертикали, от верхней области до ионосферы диффундирует заряд порядка 5% от начального распределения. Иными словами, для создания условий формирования ГЭЦ должен существовать генератор (например, пылевая буря) высотой порядка 5 км или более. Отметим, что на Марсе зафиксированы пылевые бури продолжительностью несколько месяцев, и наблюдается их сезонная периодичность. Кроме того, многочисленными наблюдениями установлено, что довольно часто вдали от фронта пылевой бури возникают изолированные торнадо (кружащийся вихрь, получивший название «пылевой дьявол»). Подобные марсианские торнадо часто достигают в высоту 8 км.

В случае одиночной области положительного заряда вклад составил порядка 7%. Очевидно, что подобное распределение, формирующееся, как правило, после грозových разрядов, способно сформировать условия для устойчивого протекания тока в глобальной электрической цепи, однако гроззовая активность на Марсе не зафиксирована. Результаты численного моделирования показали, что при заданной плотности стороннего тока плотность тока в ионосферу оказалась весьма незначительной (см. рисунок 1) и составила 2.5% от значения исходного стороннего тока на высоте 30 км.

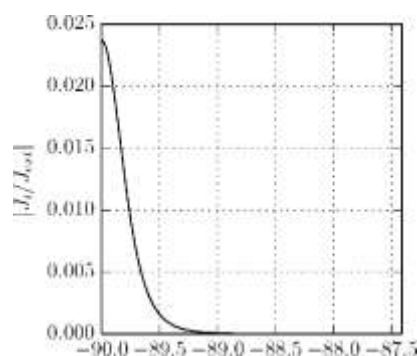


Рис. 1. Отношение плотности тока, текущего в ионосферу, на высоте 30 км нормированной на плотность стороннего тока.

На основе разработанной авторами радиально-симметричной плазмохимической самосогласованная модели воздействия возмущения электрического поля на состав мезосферы исследовано влияние высотных разрядов в атмосфере Земли на ионный состав. Результаты моделирования разряда могут использоваться при разработке дистанционных методов зондирования химического состава мезосферы по интенсивности излучения в различных диапазонах длин волн, а также могут быть использованы для оценки возмущения ионизации D-слоя, влияющего на распространение волн ОНЧ диапазона, анализа химического состава в атмосферах других планет Солнечной системы.

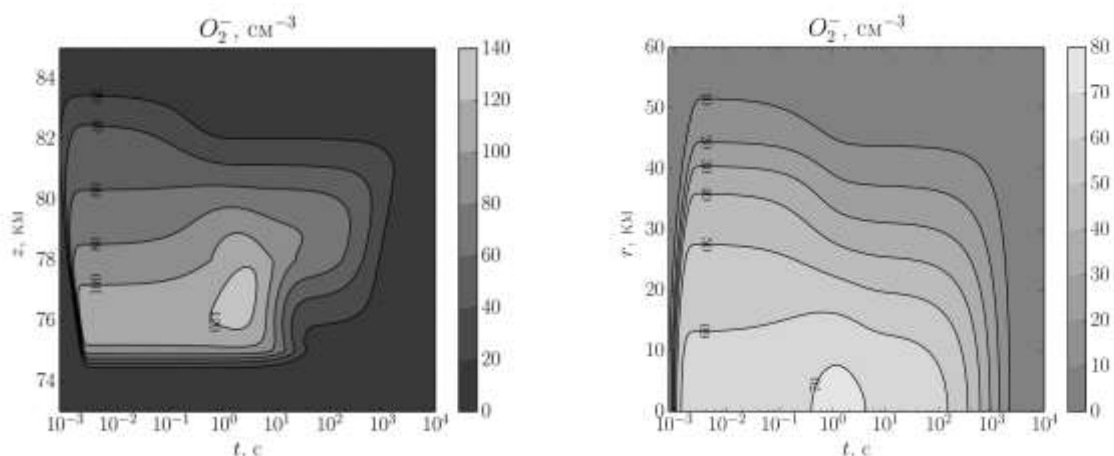


Рис. 2. Высотная зависимость концентрации ионов O_2^- [см⁻³] на оси разряда (слева) и на высоте 80 км (справа).

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). Обычно ЭД формируется в слабопроводящей среде, содержащей несколько типов гидрометеороидов (в облаках) и/или аэрозольных частиц, являющихся предметом многочисленных столкновений с последующим электрическим переносом заряда. Коллективная динамика подобных систем, как правило, характеризуется быстрым увеличением масштабного электрического поля в результате взаимодействия с микроструктурой. Проводимость среды обеспечивается положительными и отрицательными ионами, образующимися в связи с постоянным действием внешних источников ионизации (например, галактических космических лучей и радиоактивных излучений газа в нижних слоях атмосферы, в случае пылевой бури – сальтации частиц) на газ, который является достаточно плотным, чтобы время жизни электронов было очень мало. 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.

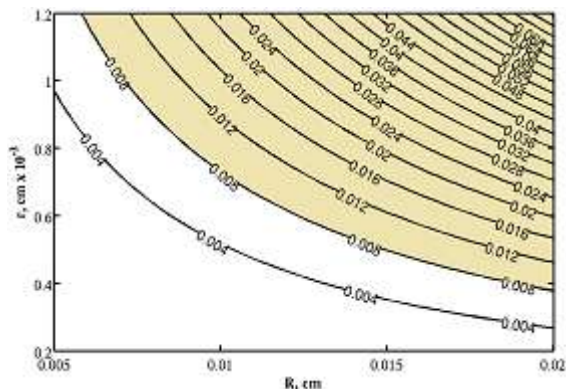


Рис. 3. Зависимость отношения флуктуаций тока зарядки к внешнему электрическому полю на радиусах малых (r) и больших (R) частиц для пылевой бури. Цветная область соответствует условиям электрического динамо (т.е. в затененной области или превышает, а напряженность электрического поля экспоненциально возрастает).

2. Был проведен мультифрактальный анализ модельной крупномасштабной токовой системы молниевое разряда 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. Компактный разряд рассматривается как результат взаимодействия двух или более биполярных стримерных структур, формирующихся в сильном крупномасштабном электрическом поле грозового облака. Электродинамика разряда рассматривается в рамках самосогласованного фрактального подхода. В рамках модели описываются основные свойства широкополосного электромагнитного излучения компактных разрядов.

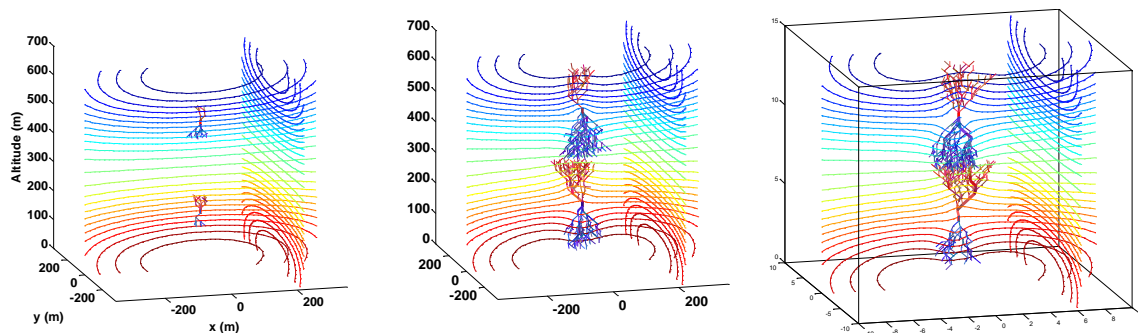


Рис. 4. Токовая система развития внутриоблачного разряда на основе мультифрактальной численной модели.

Основные параметры импульса тока на основной стадии КВР хорошо согласуются с оценками, полученными ранее в приближении передающей линии; вследствие особенностей геометрии разряда на основной стадии КВР форма наблюдаемого в дальней зоне импульса электрического поля реализуется в широком интервале параметров разряда. В рамках модели реализуется слабое (с уровнем ниже установленных в экспериментах порогов обнаружения) излучение до основной стадии разряда и синхронизация всплесков излучения в ОНЧ/НЧ и ВЧ/ОВЧ диапазонах на основной стадии КВР, что соответствует наблюдениям.

Данная модель является универсальной и может быть применена к атмосферам других планет.

Руководитель проекта: Е.А. Мареев, ИПФ РАН, mareev@appl.sci-nnov.ru

Состав группы: А.А. Евтушенко, Н.В.Ильин, Ф.А. Кутерин, С.О.Дементьева, М.В.Шаталина, С.С. Давыденко, Д.И. Иудин.

Публикации:

1. А.А. Евтушенко, Н.В. Ильин, Ф.А. Кутерин. О существовании глобальной электрической цепи в атмосфере Марса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2015. № 1. С. 57
2. Евтушенко А.А., Кутерин Ф. А., Самосогласованная модель ночного спрайта // Известия вузов. Радиофизика. 2015 (направлена в печать).
3. E. A. Mareev, S. O. Demytyeva, Turbulent Electric Dynamo in Multi-Phase Dispersive Media // Phys.Rev.Let.2015 (направлена в печать)
4. Иудин Д.И., Давыденко С.С., Фрактальная модель компактного внутриоблачного разряда. I. Особенности строения и эволюции // Известия вузов. Радиофизика. 2015, т.58, № 7, стр.530-551.
5. Davydenko S.S. and Iudin D.I., Modeling structure, dynamics, and emission of compact intracloud discharges // AGU Fall Meeting Abstracts 12/2015, rep.AE14A-04.
6. Давыденко С.С., Иудин Д.И., Фрактальная модель компактного внутриоблачного разряда. II. Характеристики электромагнитного излучения // Известия вузов. Радиофизика. 2015 (направлена в печать).