



004618918

На правах рукописи

Евдокимова Надежда Анатольевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ И
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В КЛИМАТИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ
МАРСА ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА ОМЕГА
КА "МАРС-ЭКСПРЕСС"**

Специальность 01.03.04 – Планетные исследования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

13 ЯНВ 2011

Москва 2010

Работа выполнена в отделе Физики планет и малых тел Солнечной системы Института космических исследований Российской академии наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Родин Александр Вячеславович
(МФТИ, ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Швед Густав Моисеевич (СпбГУ)

доктор геолого-минералогических наук

Комаров Илья Аркадьевич (МГУ)

Ведущая организация:

Институт физики атмосферы
им. А. М. Обухова РАН

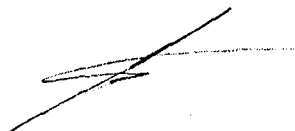
Защита диссертации состоится 27 декабря 2010 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 в Институте космических исследований РАН по адресу:
г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, подъезд 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 27 ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.113.02,
кандидат физ.-мат. наук

А. Ю. Ткаченко



Общая характеристика работы

Актуальность темы

Гидрологический цикл Марса, как современный, так и экстраполированный в геологическое прошлое планеты, уже на протяжении десятилетия является одной из самых «горячих» тем планетных исследований. Несмотря на то, что в настоящее время понятны основные механизмы сезонного переноса воды в атмосфере, роль процессов, происходящих в верхнем слое реголита Марса, таких как адсорбция, капиллярная конденсация и диффузия, гидратация и дегидратация, остается в основном невыясненной. Обсуждаемые в последнее время гипотезы о роли динамических процессов в атмосфере, в частности, стационарных планетарных волн, в формировании рельефа, химического и минералогического состава поверхности планеты, относятся к оценке долговременных последствий этих процессов и, таким образом, нуждаются в экспериментальной проверке их проявления в реальном времени. Поэтому наблюдение сезонной динамики распределения различных фаз воды на поверхности Марса – в составе гидратированных минералов, льдов, сезонной изморози – является актуальной задачей, решение которой существенно уточняет существующие модели климата планеты.

Цель работы

Цель диссертационной работы состоит в решении следующих задач:

- осуществление первичной обработки данных канала С прибора OMEGA KA Mars-Express и коррекция атмосферных искажений спектров поверхности Марса;
- восстановление по гиперспектральным изображениям Марса распределения и сезонных изменений содержания химически связанной воды в верхнем слое грунта планеты;

- восстановление распределения и микрофизической структуры льдов H_2O по гиперспектральным изображениям сезонных и постоянных полярных шапок Марса;
- интерпретация полученных результатов с использованием данных модели общей циркуляции атмосферы Марса.

Научная новизна

1. Осуществление коррекции атмосферных искажений спектров поверхности Марса *ad hoc* на основе результатов моделей общей циркуляции атмосферы, уточненных по данным наблюдений.
2. Глобальное картирование синтетического спектрального индекса связанной воды 1,93 мкм в различные сезоны.
3. Отождествление на основе распределения спектрального индекса 1,93 мкм полигидратов сульфата магния в долине Ювента, вместо обнаруженного ранее гипса.
4. Обнаружение симметричных пространственных структур в вариациях средних размеров микрочастиц ледовых покровов Северной полярной шапки и в распределении сезонных отложений льда H_2O Южной полярной шапки.
5. Исследование сезонной динамики Северной полярной шапки и воздействия на региональный климат квазистационарных волн в циркумполярном атмосферном вихре.

Все перечисленные результаты получены автором впервые.

Научная и практическая ценность работы

Эксперимент OMEGA, одна из центральных задач которого – исследование роли воды в климатической системе планеты, – в чрезвычайно насыщенной международной программе исследований Марса является одним из первых примеров применения гиперспектрометра, обладающим одновременно способностью к спектрофотометрическими измерениям и построению изображений. Выполненное в настоящей работе построение полного цикла обработки

данных эксперимента, включая коррекцию атмосферных искажений спектров поверхности Марса и оценку систематических ошибок, открывает доступ к этим данным другим ученым для решения актуальных задач климатологии и геологии Марса. В этом заключается основное **практическое значение** выполненной работы.

Другим возможным **практическим** применением работы может быть использование предложенных в ней методик коррекции атмосферных искажений по моделям общей циркуляции атмосферы, а также анализ подстилающей поверхности методами картирования спектральных индексов различных типов поверхностей в задачах дистанционного зондирования Земли и других планет. В частности, разработанные методики расчета синтетических спектров микроструктурированных сред могут быть востребованы при решении широкого круга задач дистанционного зондирования и оптики метаматериалов.

Научное значение работы состоит в детальном экспериментальном исследовании процессов взаимодействия атмосферы и поверхности в климатической системе Марса. До сих пор этому аспекту климатологии Марса уделялось недостаточно много внимания, а большинство работ на эту тему носили характер модельных расчетов либо качественной интерпретации. Упомянутая выше проблема оценки влияния буферизации атмосферной воды реголитом поднималась в течение последнего десятилетия в различных теоретических исследованиях, результаты которых сравнивались с распределением водяного пара в атмосфере планеты. В данной диссертационной работе впервые была получена непосредственная оценка содержания связанной воды в реголите и его сезонных вариаций. Уверенное отождествление повсеместного распространения гидратов в марсианском грунте в высоких широтах Марса и сравнительно малое, на пороге детектирования, содержание гидратов в низких широтах, вместе с малой амплитудой сезонных вариаций, свидетельствует об ограниченном характере воздействия механизма буферизации воды в реголите на глобальный гидрологический цикл планеты.

По данным эксперимента OMEGA было получено довольно много результатов, касающихся восстановления климата Марса в ранние геологические эпохи. При этом ряду геологических образований был приписан минералогический состав, признанный в данной диссертационной работе ошибочным. В частности, наличие гипса в верхнем слое (сите) останца каньона Ювента, перекрывающем более

ранние отложения с кизеритом и полигидратами магния, противоречит существующим термохимическим моделям, согласно которым гипс осаждается в первую очередь, а полигидраты магния – позднее. В данном диссертационном исследовании удалось доказать, что спектральные характеристики пород на вершине останца соответствуют не гипсу, как считалось ранее, а другим гидратированным минералам, предположительно тем же самым полигидратам сульфата магния. Этот результат не только уточняет минералогическую картину Марса, но и делает теорию образования на Марсе гидратных форм в ранние геологические эпохи более стройной. Решение этой локальной геологической задачи в данном междисциплинарном исследовании подчеркивает эффективность совместного применения спектрометрических экспериментов и теоретических моделей.

Значительная часть работы посвящена решению задачи отождествления волновых структур в свойствах ледовых покровов полярных шапок Марса. Идея о резонансной природе симметричной пространственной конфигурации распределения водяного пара в атмосфере и связанной воды в грунте Марса высказывалась ранее рядом авторов. На основании глобальных и мезомасштабных трехмерных численных моделей циркуляции атмосферы в районе полярных шапок были предсказаны волновые возмущения циклонической направленности. В настоящем диссертационном исследовании удалось найти доказательства существования этих процессов, основанные на анализе физических свойств поверхности. Поскольку возможности непосредственного наблюдения динамических процессов в атмосферах планет ограничены, обнаружение их следов на поверхности спектрофотометрическими методами является важным шагом в исследовании Марса и планетной климатологии в целом.

Положения, выносимые на защиту:

- Обработка данных наблюдений Марса детектором С прибора OMEGA КА «Марс-Экспресс», полученных в течение двух неполных марсианских лет MY26 и MY27, и восстановление гиперспектральных изображений поверхности Марса в интервале 0,98-2,7 мкм для данного периода времени.
- Расчет синтетических спектров микроструктурированных ледяных покровов полярных шапок Марса на основе метода дискретных диполей и в приближении геометрической оптики в диапазоне 0,98-2,7 мкм.

- Восстановление сезонного хода, глобального распределения связанной воды по полосе поглощения 1,93 мкм и льда H₂O по полосам 1,3; 1,5 и 2,0 мкм.
- Экспериментальная проверка рабочих гипотез о минералогическом составе верхнего слоя эрозионного останца в каньоне Ювента.
- Восстановление микроструктуры ледяных покровов постоянной Северной полярной шапки Марса и распределение сезонной изморози в районе Южной полярной шапки. Отождествление следов стационарных планетарных и мезомасштабных волн в системе циркуляции атмосферы Марса по свойствам подстилающей поверхности.

Личный вклад автора

Автором самостоятельно осуществлен цикл первичной обработки и организации данных, а также коррекции атмосферных искажений, что потребовало освоения параллельных вычислений на высокопроизводительном многопроцессорном комплексе, специализированного программного обеспечения научных форматов данных, работы с данными глобальных климатических моделей Марса. Глобальное и региональное картирование гидратированных минералов и льдов выполнено автором самостоятельно при консультациях с Р.О. Кузьминым и А.В.Родиным. Расчет синтетических спектров отражения гранулированных ледовых покровов полярных шапок и распределения аномалий их микроструктуры на основе данных модели общей циркуляции выполнен совместно с А.В. Родиным.

Апробация работы

Работа неоднократно докладывалась на национальных и международных конференциях по планетологии – MСАРД, COSPAR, EGU, EUROPLANET, ESTEC, LPC и др., на семинарах и конференциях ИКИ РАН, ИГАН, МФТИ, МГУ, Института Солнечной системы им. М.Планка (Германия), на заседаниях международных рабочих групп эксперимента OMEGA и проекта Mars-Express, на Международной полевой школе молодых ученых Университета Аляски и Камчатского научного центра ДВО РАН.

По материалам диссертации опубликовано 3 статьи в научных журналах, 16 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. В конце приведен список литературы. Объем диссертации – 113 страниц, 53 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 99 ссылок.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования и формулируются цели работы. Приводится краткий обзор основных результатов исследования современного климата Марса и связанных с климатом явлений на поверхности планеты методами дистанционного зондирования. Дается характеристика наиболее известных численных моделей общей циркуляции атмосферы Марса, используемых в работе, и формулируются альтернативные точки зрения на вклад процессов взаимодействия атмосферы с поверхностью, в частности, процессов сублимации, адсорбции и гидратации, на современный гидрологический цикл Марса. Также во введении приводятся характеристики эксперимента OMEGA KA Mars-Express и его основные результаты.

В главе I дается описание прибора и структуры его данных. Формулируются и обосновываются методы работы с гиперспектральными данными в ближнем инфракрасном и видимом диапазонах, их интерпретация, вводится понятие спектрального индекса. В соответствии с целями и задачами диссертационной работы обоснованы спектральные индексы полос поглощения водяного льда 1,25; 1,5 и 2,0 мкм, характеризующие распространенность ледовых покровов и микроструктуру льда, и индексы полосы гидратированных минералов 1,93 мкм.

Коррекция атмосферного поглощения осуществляется путем расчета синтетических спектров пропускания (рис.1) для каждого пиксела гиперспектрального изображения при номинальном климатологическом сценарии, построенном на основе согласования данных наблюдений с моделями общей циркуляции атмосферы.

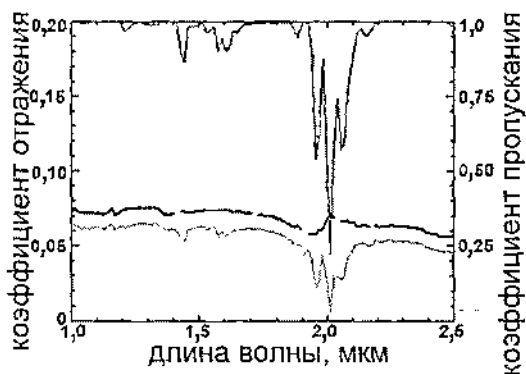
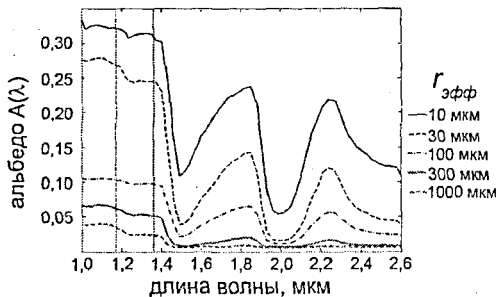


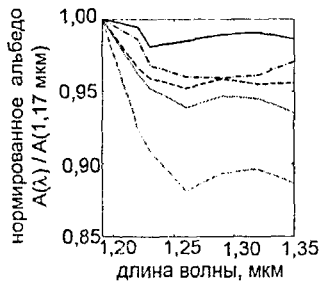
Рис. 1. Процедура коррекции наблюдаемых спектров на атмосферное поглощение: снизу вверх: исходный спектр OMEGA; скорректированный спектр отражения поверхности; теоретический спектр пропускания атмосферы

Рассмотрены различные факторы, вносящие неопределенность в измеренные спектры: шумы и нелинейность детектора, дискретное представление данных, неопределенность моделей атмосферы и др. На основе детального рассмотрения каждого источника ошибок оценены погрешности измерений гиперспектрометра, а также доверительные интервалы используемой модели атмосферы, и вытекающие из них неопределенности спектральных индексов исследуемых типов поверхности (льдов и гидратированных минералов). Показано, что как для льдов, так и для гидратов доверительный интервал спектральных индексов, имеющих смысл относительной глубины соответствующей полосы поглощения, составляет около 2,5%.

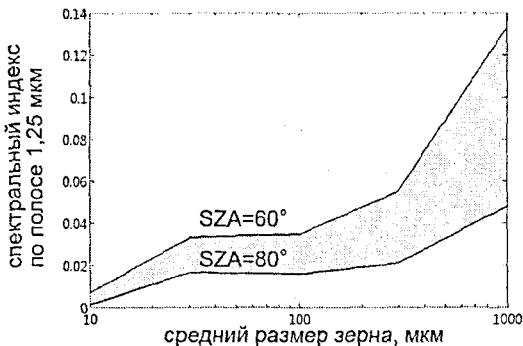
На основе различных приближений (лучевая трассировка, многократное рассеяние, расчет дифракции ближнего поля методом дискретных диполей) рассчитан перенос ИК-излучения в плотноупакованных псевдослучайных гранулированных средах, моделирующих льды H_2O и CO_2 на поверхности полярных шапок. Исследована зависимость результирующего спектра отраженного ИК-излучения от микроструктуры льдов, характерного размера зерен, плотности упаковки и других параметров. Проведена калибровка спектральных индексов, чувствительных к микроструктуре ледовых покровов (рис. 2 а-в).



(a)



(б)



(в)

Рис. 2. Калибровка спектрального индекса по теоретическим спектрам:

а – синтетические спектры отражения микроструктурированной ледяной поверхности для разных эффективных размеров частиц ($r_{\text{эфф}}$); б – те же синтетические спектры, нормированные на коэффициент отражения при $\lambda=1,17 \mu\text{m}$; в – калибровка спектрального индекса по полосе $1,25 \mu\text{m}$ в зависимости от эффективного размера частиц, слагающих поверхность

В главе II приводятся результаты глобального и регионального картирования спектрального индекса по полосе 1,93 мкм для двух марсианских лет наблюдений (MY26 и MY27). Выполнена калибровка синтетического спектрального индекса по полосе 1,93 мкм для оценки среднего относительного содержания связанной воды в верхнем слое реголита.

Подробный анализ спектров для отдельных выбранных районов (долина Маврт, каньон Ювента и др.) позволил уточнить минералогический состав. В частности, в верхней свите слоистых отложений эрозионного останца в районе каньона Ювента были отождествлены полигидратные формы сульфата магния и исключено присутствие там гипса. Принимая во внимание кинетику образования осадочных отложений гидратированных минералов, такая интерпретация представляется более обоснованной: согласно термодинамической модели гипс выпадает из исходного раствора заведомо раньше, чем сульфаты магния и железа. Таким образом, была исключена версия о позднем осаждении гипса на последних стадиях водного осадконакопления.

Также в данной главе были проанализированы зональные вариации и сезонный ход глобального распределения спектрального индекса по полосе 1,93 мкм. Несмотря на то, что в нижних и средних широтах значения данного индекса, как правило, не превышают доверительного интервала, сезонный тренд, выявленный в высоких широтах, соответствует теоретическим представлениям о буферизации атмосферной воды реголитом в процессе весенней рецессии полярных шапок. Однако существенных сезонных вариаций степени гидратации поверхности обнаружено не было, из чего можно сделать вывод об ограниченном характере буферизации химически связанной воды реголитом на сезонном масштабе времени. Повышенное содержание гидратированных минералов в районе долины Ацидалия является, по-видимому, результатом накопления в грунте атмосферной воды в районе «влажного коридора», обусловленного особенностями атмосферной циркуляции, на временной шкале, значительно превышающей марсианский год.

В главе III излагаются результаты исследования сезонной динамики Северной и Южной полярных шапок (СПШ и ЮПШ) Марса и показана их эволюция: СПШ – начиная с сезона, соответствующего $L_s = 93^\circ$ и до $L_s = 136^\circ$, и ЮПШ – от $L_s = 221^\circ$ и до $L_s = 242^\circ$.

Анализ микроструктуры льдов воды состоит в оценке характерного размера ледяных зерен на основе синтетических спектральных

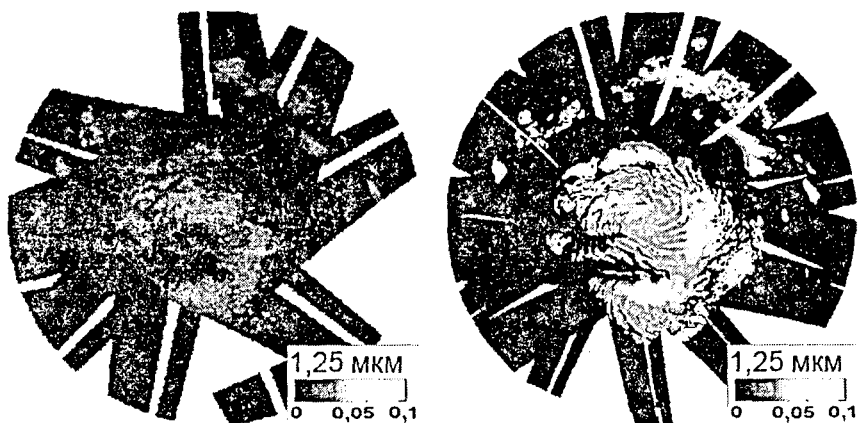
индексов, откалиброванных ранее с использованием модельных спектров в главе I. В распределении этих индексов обнаружены симметричные пространственные структуры на периферии постоянной северной полярной шапки, характеризующиеся аномально высоким темпом роста эффективного размера зерен, что связано, по-видимому, с влиянием на локальный климат стационарных волн в атмосферном циркумполярном вихре.

Распределение спектрального индекса по полосе 1,25 мкм на поверхности Северной постоянной полярной шапки изменяется при переходе от весеннего к летнему сезону: S-образная структура (рис. 3а), характеризующаяся второй зональной гармоникой, распадается на три отдельно расположенных максимума (рис.3б). В окрестности Южной полярной шапки, в силу влияния льда CO₂ на спектральный индекс 1,25 мкм, оказалось возможным проанализировать лишь общее распределение водяного льда по спектральному индексу полосы 1,5 мкм. Было обнаружено, что в течение непродолжительного периода весенней рецессии южной сезонной полярной шапки в распределении индекса проявляется симметричная структура, образованная тремя отдельно расположенными максимумами (рис.3в).

Симметричный характер и сезонная изменчивость обнаруженных структур в распределении льдов и их микрофизических свойств позволяет предположить, что эти структуры обусловлены волновыми процессами в атмосфере, характеризующимися зональными волновыми числами 2 и 3. Проверке этой гипотезы посвящена последняя глава диссертации.

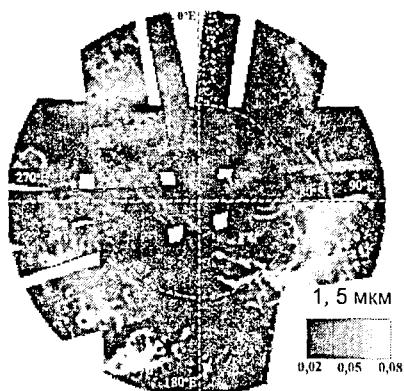
В главе IV проводится обобщение и интерпретация полученных в предыдущих главах результатов с помощью комплексной численной модели климата Марса, построенной на базе модели общей циркуляции атмосферы.

По результатам моделирования в различных метеорологических полях выявлены волновые пространственные структуры, аналогичные структурам, обнаруженным по данным эксперимента OMEGA в распределении спектрального индекса льда H₂O, чувствительного к характерному размеру зерен. Это подтверждает гипотезу о возникновении этих структур вследствие влияния на региональный климат стационарных планетарных волн и связанных с ними циклонических вихрей. В тех областях полярной шапки, где преобладает влияние околополярных циклонов, повышенная скорость приземного ветра приводит к ускорению процессов сезонной деградации ледовых покровов, в частности – к укрупнению ледяных частиц, слагающих



(a)

(б)



(в)

Рис. 3. Симметричные структуры в распределении индексов полос льда H_2O в полярных районах Марса:

а – индекс 1,25 мкм, Северный полюс, $L_S=93...97^\circ$; б – индекс 1,25 мкм, Северный полюс, $L_S=113...115^\circ$; в – индекс 1,5 мкм, Южный полюс, $L_S=236...242^\circ$

поверхность. Симметричные структуры, которые могут быть приписаны стационарным планетарным волнам, выявлены также в распределении индекса гидратированных минералов 1,93 мкм в северной околполярной области.

Симметричная структура с зональным числом 3 в распределении льда H_2O при $L_S = 221...242^\circ$ в окрестности Южной полярной шапки обусловлена, по-видимому, зональными вариациями интенсивности стока атмосферной воды на поверхность, вызванными влиянием на метеорологические параметры мезомасштабных волновых процессов в атмосфере в период накопления Южной сезонной полярной шапки, то есть в сезон на полгода раньше наблюдений. В период весенней рецессии, по мере обнажения реголита, локализируются остаточные отложения в тех районах, где интенсивность осадков в осенний период была максимальной.

В заключении представлены основные результаты, полученные в диссертационной работе, и формулируются выводы:

- Проведена первичная обработка данных канала С гиперспектрометра OMEGA KA Mars-Express за два марсианских года наблюдений MY 26-27. Выполнена коррекция атмосферных искажений спектров отражения поверхности и оценены источники их неопределенности. Вычислены синтетические спектральные индексы по полосам поглощения водяного льда и гидратированных минералов и проведена их количественная калибровка.
- Построены глобальные и региональные карты распределения индекса по полосе связанной воды 1,93 мкм в различные сезоны: $L_S = 0...90^\circ$, $L_S = 90...180^\circ$, $L_S = 180...270^\circ$, $L_S = 270...360^\circ$.
- Высказанная ранее гипотеза о наличии гипса в материале верхнего слоя останца в каньоне Ювента не нашла подтверждения. Вероятными кандидатами на роль источника полосы поглощения 1,93 мкм являются полигидраты сульфата магния.
- Незначительные сезонные вариации глобального распределения связанной воды в грунте Марса свидетельствуют об ограниченном вкладе механизмов гидратации и дегидратации реголита в глобальный гидрологический цикл. Помимо хорошо известной околполярной области с высоким содержанием гипса, наибольшее содержание связанной воды в грунте наблюдается в сезон после весеннего равноденствия в районе долины Ацидалия. Именно в этой области

локализован наиболее эффективный транспортный коридор меридионального переноса примесей атмосферными потоками.

- Построены региональные карты спектральных индексов водяного льда в полярных районах Марса. Обнаружены сезонно изменчивые симметричные структуры в распределении параметров зернистости ледяного покрова Северной полярной шапки, а также в глобальной пространственной структуре остаточных отложений льдов H_2O в окрестности Южной полярной шапки в момент сезонной рецессии. На основе анализа результатов моделирования общей циркуляции атмосферы Марса сделан вывод о том, что эти структуры имеют волновую природу и связаны с мезомасштабными возмущениями околполярной циркуляции атмосферы.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. **Евдокимова Н.А.,** Кузьмин Р. О., Родин А. В., Федорова А. А., Кораблев О.И., Бибринг Ж.-П. Исследование распределения связанной воды водяного льда и инея на поверхности Марса: обработка и коррекция данных наблюдений спектрометра OMEGA с борта КА «Mars-Express» // *Астрономический вестник*. 2009. Т. 43. № 5. С. 387-480.
2. **Kuzmin R.O., Mironenko M.V., Evdokimova N.A.** Spectral and thermodynamic constraints on the existence of gypsum at the Juventae Chasma on Mars // *Planet. Space Sci.* 2009. V. 57. №8-9. P. 975-981.
3. **Родин А. В., Евдокимова Н.А.,** Кузьмин Р. О., Федорова А. А., Кораблев О.И., Бибринг Ж.-П. Отождествление следов атмосферных планетарных волн в динамике сезонной сублимации и конденсации льдов в полярных районах Марса по данным ИК-гиперспектрометра OMEGA КА Mars-Express // *Космические исследования*. 2010. V. 48. №2. С. 1-8.
4. **Евдокимова Н. А.,** Кузьмин Р. О., Родин А. В. и др. Картирование адсорбированной и связанной воды в реголите Марса на основании данных, полученных прибором OMEGA, КА "Марс-Экспресс" // *Материалы XLVIII Научной конференции МФТИ*. 2005. С. 32-33.
5. **Evdokimova N.A., Kuzmin R.O., Rodin A.V., Fedorova A.A., Bibring J.-P.** Mapping of adsorbed and bound water in mars regolith based on Mars-

Express/OMEGA data // 42th Vernadsky-Brown Microsymposium on Comparative Planetology, Moscow, Russia, 2005.

6. **Evdokimova N. A., Kuzmin R. O., Rodin A. V., Fedorova A. A., Bibring J.-P.** Mapping of the water ice and bound water spectral index in the Northern polar region of Mars, based on OMEGA/Mars-Express data //44th Vernadsky-Brown Microsymposium on Comparative Planetology, Moscow, Russia, 2006.
7. **Kuzmin R.O., Mironenko M.V., Evdokimova N.A.** Is the gypsum spectral signature exists in the Juventae chasma on Mars? // European Mars Science and Exploration Conference: Mars Express & Exomars, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 12 - 16 November, 2007.
8. **Evdokimova N. A., Kuzmin R. O., Rodin A. V., Fedorova A. A., Korablev O.I., Bibring J.-P.** Seasonal dynamics of the water ice on the surface of the Northern polar cap of Mars based on the OMEGA data // 46th Vernadsky-Brown Microsymposium on Comparative Planetology, Moscow, Russia, 2007.
9. **Evdokimova N.A., Rodin A.V., Fedorova A.A., Kuzmin R.O., Кораблев О.И., Bibring J.-P.** Wave activity in the circumpolar water cycle during the MY26 aphelion season inferred from Mars Express/OMEGA data // EGU General Assembly-2007, 15-20 April, Vienna, Austria, 2007. V. 9. Abstract №09606.
10. **Evdokimova N.A. Kuzmin R.O. Rodin A.V. Fedorova A.A. Korablev O.I. Bibring J.P.** Soil hydration of the north circumpolar region of Mars retrieved from 1.91 μm absorption based on Omega data // 48th Vernadsky-Brown Microsymposium on Comparative Planetology, Moscow, Russia, 2008.
11. **Evdokimova N. A., Kuzmin R. O., Rodin A. V., Fedorova A. A.** Seasonal dynamic of water on the surface of Mars during MY27 and M28 apheleon and pre-aphelion seasons based on the OMEGA/Mars-Express data //37th COSPAR Scientific Assembly, 13-20 July, Montreal, Canada, 2008. Abstract № 3630.
12. **Kuzmin R.O., Zabalueva E.V., Evdokimova N.A., Christensen P.H., Mitrofanov I.G., Litvak M.L.** The seasonal variations of the bound water and water ice amount within the surface layer of the martian soil based on

the TES, HEND and OMEGA data analysis // Mars Water cycle workshop (Paris). 2008.

13. **Kuzmin R.O., Mironenko M.V., Evdokimova N.A.**, Mars: Spectral and Thermodynamic Restrictions on the Gypsum Existence in the Juventae Chasma // Lunar and Planetary Science XXXIX (39th LPSC), 2008. No. 1390. P.1575.
14. **Evdokimova N. A., Rodin A., Kuzmin R. O., Fedorova A. A.** Changes in the Martian surface composition related to water cycle: evidence for atmospheric wave phenomena //43rd ESLAB Symposium – International Conf. Comparative Planet, ESTEC, 2009.
15. **Evdokimova N. A., Rodin A. V., Kuzmin R.O., Fedorova A. A.** Search for signature of the atmosphere-surface interactions in the seasonal Martian water cycle based on OMEGA/Mars Express data // European Planetary Science Congress-2009 Abstracts, 13-18th September, Potsdam, Germany, 2009. V. 4. EPSC2009-665-2.
16. **Rodin A. V., Burlakov A. V., Fedorova A. A., Evdokimova N. A., Kuzmin R. O. and Wilson R. J.** Simulation of the Martian water ice clouds, frosts and surface ices with General Circulation Model // European Planetary Science Congress-2009 Abstracts, 13-18th September, Potsdam, Germany, 2009. V. 4. EPSC2009-666-1.
17. **Evdokimova N.A., Rodin A.V., Fedorova A.A., Kuzmin R.O., Maltagliati L. and Bibring J.-P.** Atmosphere-surface interactions in the Martian water cycle during MY 27-28 retrieved from OMEGA data // EGU General Assembly-2009, 19-24 April, Vienna, Austria, 2009. V. 11. EGU2009-12914.
18. **Evdokimova N. A., Rodin A.V., Kuzmin R. O., Fedorova A. A.** Mesoscale variability of water vapor, surface ice aging and precipitation in the Martian polar regions // 38th COSPAR Scientific Assambley, 18-25 July, Bremen, 2010. Abstract Fri-086 B02-0056-10.
19. **Evdokimova N.A., Rodin A. V., Kuzmin R. O, Fedorova A.A.** Constrains on atmosphere-surface water exchange on Mars derived from OMEGA/MEX data // European Planetary Science Congress-2010, 19-24 September, Rome, 2010. Abstract EPSC2010-820.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН

117997, Москва, Профсоюзная 84/32

Подписано к печати 11.11.10

Заказ 2227

Формат 70x108 1/32 Тираж 100

0,7 уч.-изд.л.