

PACS numbers: 07.87.+v, 96.12.-a, 96.30.Gc
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201307h.0762

Спектроскопия Марса с космических аппаратов: новые методы, новые результаты

О.И. Кораблёв

1. Современная проблематика Марса

После прорывной миссии Viking (1972 г.) и длительного перерыва в исследованиях Марса, вызванного, с одной стороны, негативным результатом экспериментов по обнаружению жизни, с другой — серией неудач космических проектов, в наше время Марс интенсивно и, казалось бы, всесторонне исследуется космическими аппаратами (КА). Сейчас на орбите вокруг Марса работают спутники Mars Odyssey (с 2001 г.) [1], Mars Express (с 2003 г.), Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) (с 2005 г.) [2]. На поверхности ещё подаёт признаки жизни ровер Opportunity [3] и недавно начал работу ровер Curiosity [4].

К числу ключевых результатов, полученных после экспедиции Viking, прежде всего на космических аппаратах Mars Global Surveyor (MGS) (1998–2006 гг.) Mars Odyssey и Mars Express, относятся: открытие остаточной намагниченности коры Марса [5], глобальная альтиметрия Марса и построение его фигуры [6], глобальное картографирование Марса и датировка его геологических единиц [7, 8], открытие и глобальное картирование подпочвенной воды [9, 10] и др. Тем не менее ряд важнейших научных проблем, связанных как с фундаментальными вопросами, так и с задачами будущего освоения Марса, ещё ожидают решения или находятся в процессе накопления и уточнения знаний.

Можно выделить три основные группы научных проблем: 1) внутреннее строение планеты и вулканизм; 2) эволюция климата и современный климат планеты; 3) обитаемость планеты как в прошлом, так и в настоящем.

Современные модели внутреннего строения Марса не могут ответить на вопросы о толщине коры и её составе, о составе мантии (насколько мантия Марса обогащена железом по сравнению с мантией Земли) и её неоднородностях, о размерах и строении ядра Марса [11]. На Марсе имеется множество следов вулканической активности, в том числе самый большой вулкан в Солнечной системе — гора Олимп, которая достигает 25 км в высоту и имеет диаметр в основании до 600 км, обнаружены также, по видимому ископаемые, выходы термальных вод [12]. Однако самые свежие кальдеры вулканов по метеоритной датировке имеют возраст более 100 млн лет [13], а картирующий радиометр теплового диапазона на КА Mars Observer, специально предназначенный для поиска "горячих точек", не обнаружил ни одной из них [14]. Есть ли следы конвекции мантии и признаки вулканизма в настоящее время?

Разрежённая атмосфера Марса не снижает важности климата как ключевого фактора, определяющего усло-

вия на поверхности и во многом сформировавшего её современный рельеф. Мониторинг климатических параметров имеет фундаментальное значение и является необходимым для разработки стратегии освоения Марса. Но наибольший интерес, связанный, в первую очередь, с гипотезами раннего тёплого Марса и возможностью возникновения биосферы в прошлые эпохи, вызывает проблема глобальных климатических изменений на планете. К настоящему времени установлены две основные группы таких изменений, относящихся к различным шкалам времени. Ископаемые долины, русла рек, целые дренажные системы охватывают обширные области планеты, указывая на существование обильной жидкой воды на поверхности [15]. Возраст таких форм рельефа достигает 3,5 млрд лет [7]. Фигура планеты глобально несимметрична, и всё северное полушарие, представляющее собой низину [16], по одной из гипотез [17] было заполнено океаном. Жидкая вода на поверхности оставила следы и в минералах, которые могли сформироваться только при её наличии [18, 19]. С другой стороны, многие из наблюдаемых долин являются скорее результатом эрозионной деятельности ледников, а не жидкой воды [20]. Возраст этих форм ледниковой эрозии значительно меньше, и есть замечательно молодые образования [13].

Моделирование небесно-механических параметров планеты показало, что Марс подвержен значительным колебаниям наклона оси (от 15° до 47°) [21]. Эти циклы с характерным периодом около 50000 лет аналогичны циклам Миланковича на Земле, но выражены гораздо сильнее, так как Луна оказывает стабилизирующее действие на наклон земной оси, а Марс более подвержен влиянию Юпитера. На колебания оси накладываются медленные вариации эксцентриситета орбиты Марса вокруг Солнца, что в совокупности приводит к значительным [22] изменениям инсоляции и, возможно, оледенениям большей части поверхности планеты [23]. Запасы воды в мантии практически неограниченны [24, 25], и в моменты усиливающейся вулканической активности может происходить пополнение запасов воды на поверхности. Таким образом, вода и ледники являются важнейшими факторами, определяющими современный облик поверхности планеты.

Какие процессы определяют перенос воды по планете, где она сохраняется в межледниковые периоды, такие как при современном наклоне оси 23,5°, и какова скорость её современной диссипации?

Поверхность Марса исключительно враждебна к существованию жизни: экстремальные температуры, ультрафиолетовое излучение, наличие активных окислителей предопределяют её практическую стерильность. С другой стороны, период раннего тёплого Марса, начавшийся предположительно после прекращения катастрофической бомбардировки и закончившийся другой, неизвестной, катастрофой, инициировавшей угасание магнитного поля, потерю атмосферы и похолодание, мог длиться до 700–800 млн лет. За это время на планете могли возникнуть или могли быть занесены на неё живые организмы. Поиск ископаемых следов жизни в марсианских метеоритах пока не дал однозначных результатов. Но способность живых форм приспосабливаться к самым экстремальным условиям на Земле позволяет предположить возможность их выживания в защищённых нишах вплоть до нашего времени. В пользу суще-

О.И. Кораблёв. Институт космических исследований РАН,
Москва, РФ
E-mail: korab@iki.rssi.ru

ствования таких оазисов в пределах относительной доступности говорят многочисленные наблюдения жидкой воды на поверхности [26–28]. Условия на поверхности Марса близки к условиям тройной точки воды, и в тёплое время суток вследствие таяния обнажающейся мерзлоты образуются короткие ручьи с сужающимися руслами, как в аридных районах на Земле. Но наиболее мощным толчком к исследованиям марсианской экзобиологии послужило открытие метана в атмосфере. Этот вопрос подробнее рассматривается в разделе 6.

Каковы были условия на раннем Марсе, достаточно ли силён был парниковый эффект для того, чтобы поддерживать условия раннего "тёплого и влажного" Марса? Сколько в действительности продолжался этот период, и насколько разрушительной была катастрофа, приведшая к его окончанию? Возможно ли обнаружение жизни или её следов на поверхности? Насколько достоверны измерения биогенных газов, и свидетельствуют ли они о современной биологической активности?

2. Задачи оптической спектроскопии в исследованиях Марса

Методы оптической спектроскопии, применяемые для исследования как атмосферы, так и поверхности Марса, в настоящее время являются одним из основных, если не главным, источником информации, получаемой дистанционно. Наиболее освоены "оптический" диапазон спектра электромагнитного излучения, от ультрафиолетового (УФ) диапазона (1000–2000 Å) до "теплого" инфракрасного (ИК) диапазона (25–50 мкм). Исследования ведутся с наземных обсерваторий в основном в окнах прозрачности в среднем ИК-диапазоне, а также в микроволновом диапазоне, с орбитальных обсерваторий, в УФ-диапазоне (Hubble Space Telescope) и дальнем ИК-субмиллиметровом диапазоне (Herschel Space Observatory), но главным образом — с космических аппаратов, находящихся на орбитах вокруг Марса.

Для исследования поверхности наиболее информативен диапазон отражённого солнечного излучения, соответствующий ближнему и среднему ИК-диапазонам (1–5 мкм). Диапазон отражённого солнечного излучения включает в себя полосы основных породообразующих минералов и является оптимальным для поиска гидратированных минералов, глин, осадочных пород. Эти данные гораздо легче поддаются интерпретации по сравнению с полученными в тепловом ИК-диапазоне. По мере движения КА вдоль орбиты строится изображение поверхности, каждой точке которого соответствует спектр. Таким исследованиям благоприятствует тонкая атмосфера Марса, оставляющая доступным для анализа практически весь спектральный диапазон, за исключением нескольких участков, на которых преобладает атмосферное поглощение. С другой стороны, поверхность Марса почти повсеместно покрыта слоем тонкозернистой пыли однородного состава. Это несколько снижает диагностический потенциал минералогического картирования. Съёмка в ИК-диапазоне позволяет исследовать глобальное и местное распространение породообразующих минералов, вулканических пород и продуктов выветривания и ответить на ключевые вопросы, связанные с вулканизмом и историей климата.

Атмосферные исследования проводятся в широком спектральном диапазоне. УФ-наблюдения позволяют

исследовать верхнюю атмосферу, возбуждённые состояния молекул, распределения некоторых газов, например озона. В ближнем и среднем ИК-диапазонах хорошо измеряются водяной пар и многие малые составляющие, в том числе метан. CO₂-атмосфера позволяет дистанционно проводить достаточно точные измерения давления. В тепловом диапазоне спектра возможен мониторинг термического состояния атмосферы: измерение спектров 15-микрометровой полосы CO₂ позволяет восстановить профили температуры на высотах от 0 до 50–60 км. При высоком спектральном разрешении детектируются малые атмосферные газы. Для исследования атмосферного аэрозоля, включая пылевую и конденсационные (H₂O и CO₂) составляющие, необходимо использовать максимально широкий спектральный диапазон. Атмосферные наблюдения проводятся в надир (как и исследования поверхности), в том числе на ночной стороне планеты, а также на лимбе и в конфигурации солнечных затмений, что позволяет наблюдать большие атмосферные массы. Спектральные исследования атмосферы являются главным источником данных для климатического мониторинга, для объяснения химических процессов в атмосфере и позволяют детектировать малые атмосферные составляющие, в том числе, возможно, вулканического и биологического происхождения.

3. Спектральные исследования Марса

Спектральные измерения начались на самой ранней стадии исследования Марса космическими аппаратами. Спектрометры УФ- и ИК-диапазонов были установлены на КА Mariner-6 и -7 [29, 30], спектрофотометры и спектрополяриметры — на КА Марс-2, -3 и -5 [31–35]. Во время этих пролётных и коротких орбитальных миссий 1971–1973 гг. были получены первые данные о структуре и составе атмосферы, а также температуре поверхности. На КА Mariner-9, проработавшем на орбите вокруг Марса 11 месяцев (в 1971–1972 гг.) был исследован сезонный цикл озона в УФ-диапазоне [36] и получен ряд других результатов в ИК-диапазоне [37]. В космической экспедиции Viking спектральные наблюдения в ближнем ИК-диапазоне позволили исследовать сезонный цикл водяного пара [38], а радиометрические наблюдения в тепловом ИК-диапазоне — термическую структуру атмосферы и провести мониторинг температуры поверхности [39, 40] в течение двух лет.

После длительного перерыва в исследованиях Марса космическими аппаратами непродолжительная орбитальная миссия "Фобос-2" (1988–1989 гг.) позволила получить ряд пионерских результатов. Космический эксперимент TES (Thermal Emission Spectrometer) на КА MGS дал относительно немного данных о поверхности планеты, но позволил провести мониторинг основных климатических параметров (температура атмосферы, содержание аэрозоля, водяного пара) в течение трёх марсианских лет. Радиометр высокого пространственного разрешения THEMIS (Thermal Emission Imaging System) на КА Mars Odyssey провёл глобальное картирование тепловой инерции грунта и позволил сделать ряд важных выводов относительно геологии Марса. Как упоминалось, следов действующей геотермальной или вулканической активности обнаружено не было.

Наиболее полно спектральными приборами оснащён КА Европейского космического агентства (ЕКА)

Таблица. Спектральные исследования Марса орбитальными космическими аппаратами после миссии Viking

Программа	Прибор	Спектральный диапазон, мкм	Спектральное разрешение	Разрешение на поверхности	Основные результаты
"Фобос-2", 1989 г.	ИСМ – КРФМ*	0,315–0,600 0,8–3,1	30 нм 50 нм	20 × 30 км	Минералогическое картирование ограниченного района, породообразующие минералы [44]
	ТЕРМОСКАН	0,60–0,95 8,5–12,0	— —	2 км	Первое картирование тепловой инерции поверхности [45]
	"Огюст"	0,22–0,43 0,76, 0,94 1,9, 3,7	10–30 нм — 2–3 нм	—	Вертикальные профили аэрозоля и водяного пара [46–48]
Mars Global Surveyor, 1997–2004 гг.	TES	5,8–50,0	6, 12 см ⁻¹	3 км	Глобальное минералогическое картирование, вулканические породы, локально обнаружен гематит, не обнаружены карбонаты, глины и сульфаты [49]. Мониторинг климата Марса [50]
Mars Odyssey, с 2001 г.	THEMIS	0,45–0,85 6,5–15,0	5 полос 9 полос	100 м	Глобальное картирование тепловой инерции поверхности [14]
Mars Express, с 2003 г.	OMEGA	0,35–1,00 1,0–2,5 2,5–5,1	7 нм 14 нм 20 нм	0,3–5,0	Глобальное минералогическое картирование, локально обнаружены гидратированные минералы, глины и сульфаты [51]
	PFS	2–40	2 см ⁻¹	> 9 км	Открытие метана в атмосфере [52]
	SPICAM	0,118–0,320 0,9–1,7	1 нм 3,5 см ⁻¹	> 1 × 50 км > 4 км	Многочисленные атмосферные результаты (см. текст)
Mars Reconnaissance Orbiter, с 2005 г.	CRISM	0,362–3,920	6,6 нм/пиксел	18 м	Подтверждение результатов OMEGA, локально обнаружены карбонаты, серпентин [53, 54]
	MCS	16,5–42,1	9 полос	5 км, лимб 1,0 × 1,7 км	Вертикальная структура атмосферы и аэрозоля [55–57]

* Искусственный спутник Марса – Комбинированный радиометр-спектрофотометр.

Mars Express. Запущенный в 2003 г., этот космический аппарат решает задачи, планировавшиеся ещё в российском проекте Марс-96. Все три спектральных прибора созданы с существенным российским участием. Основные результаты, полученные с помощью этих приборов, приведены в разделах 4–7.

Рoverы Spirit и Opportunity, доставленные на поверхность Марса в 2003 г., оснащены фурье-спектрометрами Mini-TES теплового ИК-диапазона [41]. Оптический вход каждого из приборов, расположенный на мачте, может быть ориентирован в любом направлении. Предназначенный в основном для выбора интересных образцов и планирования движения марсоходов эксперимент Mini-TES дал ряд важных самостоятельных результатов, в том числе касающихся приповерхностного слоя атмосферы [42, 43].

Наконец, КА MRO оснащён гиперспектральной системой высокого пространственного разрешения CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars). Этот прибор по принципу работы близок прибору OMEGA на КА Mars Express, и мы рассмотрим их результаты совместно в разделе 4. На MRO установлен также лимбовый радиометр MCS (Mars Climat Sounder) для наблюдения вертикальных профилей атмосферы в полосах CO₂, H₂O и аэрозоля.

Основные результаты спектральных наблюдений Марса после миссии Viking со ссылками на ключевые работы приведены в таблице.

4. Спектральное картирование с орбиты и история климата Марса

Эксперимент OMEGA на борту КА EKA Mars Express предназначен для картирования состава поверхности планеты с разрешением 0,3–5,0 км. Прибор регистрирует отражённое солнечное излучение в видимом и инфракрасном диапазонах. Поле зрения прибора, соответствующее 1 пикселу, составляет 1,2 мрад; сканирование поперёк вектора орбитальной скорости позволяет картировать полосу шириной от 45 км (из периферии орбиты) до 600 км на поверхности планеты. Каждой точке полученного таким образом изображения соответствует спектр в области длин волн 0,35–5,10 мкм (см. таблицу). Прибор разработан и создан для проекта Марс-96 во Франции под руководством Ж.-П. Бибринга; сканер прибора и входная оптика изготовлены в Институте космических исследований (ИКИ) РАН. Название эксперимента OMEGA (аббревиатура от франц. — Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité) предполагает, что эксперимент призван распознавать, помимо состава поверхности, минералогии, различные состояния воды (лёд, гидратированные минералы, углекислотный лёд) для исследования взаимодействия атмосфера–поверхность (циклы воды и углекислого газа), формирования и развития коры планеты, образования и возможности сохранения обитаемых зон.

Впервые глобальное минералогическое картирование Марса с разрешением 3 км было проведено в тепловом ИК-диапазоне в эксперименте TES/MGS [49]. Были

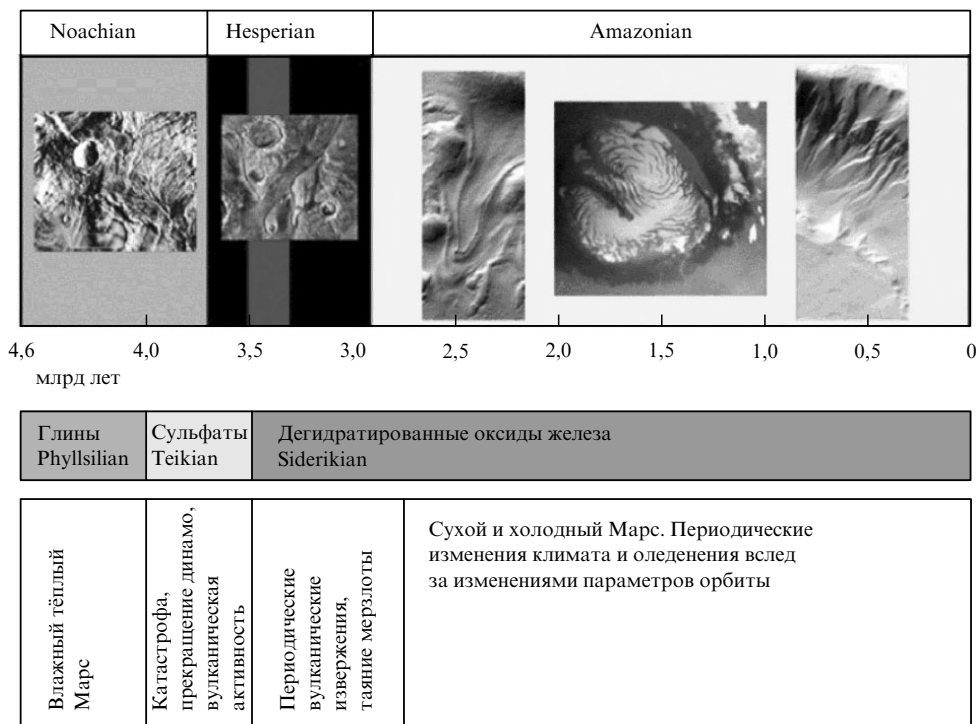


Рис. 1. (а) Классическая хронология Марса: ноахийская эпоха (Noachian), характеризующаяся высоким уровнем метеоритной бомбардировки и вулканической активности, а также следами активности воды на поверхности; гесперийская эпоха (Hesperian), во время которой продолжалась вулканическая активность и происходили катастрофические наводнения; амазонская, современная эпоха (Amazonian). (б) Хронология, основанная на геохимии продуктов выветривания [51].

определены основные составляющие поверхности: базальты, характерные для южных древних возвышенностей, и андезиты на более молодых северных равнинах. "Влажное" прошлое планеты было подтверждено локальным детектированием гематита — минерала, формирующегося при наличии воды в умеренных климатических условиях или в геотермальных водах. Осадочные породы, карбонаты, и результат химического выветривания, глины, обнаружены не были, что позволило сделать выводы о доминировании в истории Марса сухого холодного климата. Также не были обнаружены сульфаты, свидетели вулканической активности.

Более информативный спектральный диапазон и на порядок лучшее пространственное разрешение в эксперименте OMEGA позволили картировать значительно более разнообразный состав поверхности и сделать ключевые выводы об истории климата Марса. Железосодержащие породообразующие силикатные минералы были обнаружены и картированы в обоих полушариях. По полосе 1,9 мкм идентифицированы гидратированные минералы — филлосиликаты. Эти продукты выветривания в присутствии воды, сорт глин, были обнаружены лишь на ограниченных участках, совпадающих с обнажениями древних кратеров. В то же время их не оказалось в окрестностях кратеров, предположительно вскрывающих уровень вечной мерзлоты, а также в местностях со следами древних русел. Филлосиликаты не были обнаружены и на более молодых северных вулканических равнинах. Последнее служит подтверждением того, что выветривание в этот период истории планеты происходило в отсутствие воды. Гидратированные сульфаты найдены во многих местах, обычно совпадающих со

светлыми отложениями. Карбонаты, поглотившие на Земле основной запас атмосферного CO₂, в эксперименте обнаружены не были.

Совокупность новых данных, полученных в эксперименте OMEGA, с использованием новых хронологических оценок [7] позволила сделать важные выводы об эволюции климата Марса (рис. 1). Так, две широко распространённые группы гидратированных минералов, филлосиликаты и сульфаты, образовались в существенно разные периоды: глины, формирование которых требует наличия обильной воды, — в ранний период ноахийского периода, а сульфаты, формирующиеся в кислой и, скорее всего, достаточно сухой среде, образовались позднее — около 4–3,5 млрд лет назад [58]. Таким образом, период "раннего тёплого" Марса мог закончиться раньше, чем предполагает классическая хронология. В дальнейшем Марс оставался сухим и активность на его поверхности была сильно ограничена, что позволило медленным процессам окисления и выветривания сформировать современный облик планеты [51].

Загадка карбонатов на Марсе была решена позднее. Для их уверенной идентификации потребовалось ещё большее пространственное и спектральное разрешение прибора CRISM/MRO [59]. Древние карбонаты, в которых, возможно, захоронена ранняя атмосфера Марса, наблюдаются в ограниченных районах, на склонах долин и метеоритных кратеров [53].

5. Атмосфера и климат Марса по результатам Mars Express

Ещё два прибора на борту КА Mars Express — SPICAM и PFS — предназначены в основном для исследования

атмосферы и климата планеты. Так же как и OMEGA, приборы SPICAM и PFS унаследованы от КА Марс-96. При этом прибор PFS/Mars Express стал фактически копией своего предшественника, а массу нового прибора SPICAM пришлось уменьшить почти на порядок, что потребовало применения при его создании совершенно новых подходов.

Прибор SPICAM (SPectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars) представляет собой комбинацию двух спектрометров, УФ- и ИК-диапазона, предназначенных для зондирования атмосферы Марса различными способами: наблюдения отражённого и рассеянного солнечного излучения в надир, на лимбе, а также исследование вертикальной структуры и профилей состава атмосферы в режиме звёздных и солнечных затмений. В процессе затмения излучение звезды или Солнца ослабляется атмосферой, что позволяет непосредственно измерять её пропускание на лимбе [60]. Спектрометр УФ-диапазона (118–320 нм) (см. таблицу), построенный по классической схеме, имеет всего две отражающие поверхности: зеркало коллиматора и дифракционную решётку. В фокусе зеркала находится щель спектрометра, удаляемая при наблюдениях звёзд. Спектр формируется на матричном детекторе с усилителем изображения, вторая координата которого используется для грубого картирования [61]. Спектрометр ИК-диапазона (1,0–1,7 мкм) построен по принципу акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ) [62], впервые применённого нами на межпланетных космических аппаратах. При разрешающей силе $\lambda/\Delta\lambda \approx 1800$ прибор имеет массу менее 1 кг [63, 64]. Прибор SPICAM создан во Франции с участием Бельгии, а ИКИ РАН поставил ИК-спектрометр, полностью изготовленный в России. Руководитель эксперимента Ж.-Л. Берто.

Прибор PFS (Planetary Fourier Spectrometer), или ПФС (Планетный фурье-спектрометр), имеет два канала. Оба канала, которые построены по принципу двойного маятника, имеют апертуру 5 см. Коротковолновый (1,2–5,0 мкм) и длинноволновый (5–45 мкм) каналы различаются светодетекторами и детекторами, оптимизированными для соответствующих длин волн [65]. В коротковолновом канале регистрируется солнечное излучение, рассеянное и отражённое планетой, а в длинноволновом — собственное излучение атмосферы и поверхности в тепловом диапазоне спектра. Спектральное разрешение прибора без аподизации составляет $1,2 \text{ см}^{-1}$, при аподизации оно снижается до $1,4\text{--}2,0 \text{ см}^{-1}$. Разработка ПФС для проекта Марс-96 началась в России под руководством В.И. Мороза, но в новых условиях, для проекта Mars Express, создание этого прибора переместилось в Италию и руководителем работ стал В. Формизано.

Одним из интересных открытий, сделанных в эксперименте SPICAM, стало обнаружение авроральных свечений на Марсе [66]. Эти свечения, связанные с выпадением заряженных частиц в районах сгущения силовых линий остаточного магнитного поля Марса [5], по своей природе аналогичны полярным сияниям на Земле, но наблюдаются в умеренных широтах. В момент аврорального события обычный УФ-спектр ночного неба Марса, в котором доминируют полосы NO (также впервые обнаруженные SPICAM [67]), меняется и в нём появляются возбуждённые полосы CO. В ходе эксперимента было открыто и другое ночное свечение атмо-

сферы Марса: $\text{O}_2^1\Delta_g$ на полосе 1,27 мкм, обнаруженное прибором OMEGA [68] и исследованное прибором SPICAM [69]. Ночные свечения NO и O_2 образуются при высвечивании возбуждённых молекул, занесённых с дневной стороны. Их наблюдения важны для исследования глобальной циркуляции верхних слоёв атмосферы.

Дневное свечение $\text{O}_2^1\Delta_g$ [70] используется для оценки содержания озона — ключевого индикатора фотохимии Марса, — измеряемого SPICAM и непосредственно в УФ-диапазоне по полосе Хартли (по полосе 250 нм) как в надир [71], так и в режиме затмений [72]. Эти результаты позволили предположить наличие вклада гетерогенных реакций на поверхности частиц конденсационного аэрозоля в важнейшие фотохимические циклы Марса [73].

Основной научной задачей ИК-канала SPICAM является исследование атмосферного водяного цикла. Действительно, из основных резервуаров воды на планете, активно участвующих в гидрологическом цикле (вечная мерзлота, реголит, полярные шапки, атмосфера), количественно измерены лишь (ориентировочно) объём воды, заключённый в полярных шапках, и (гораздо более точно) атмосферная вода и процессы её переноса. Несмотря на малое количество водяного пара в разрежённой атмосфере (1–50 в осаждённых мкм), глобальный перенос воды и особенности полярных шапок определяются климатическими процессами, которые в свою очередь исследуются посредством мониторинга атмосферного водяного пара. Процессы переноса изменяются в зависимости от наклона оси и эксцентриситета Марса [22], определяя оледенения, образование ледников в низких широтах [74, 75] и т.д. SPICAM продолжил мониторинг атмосферного водяного пара, начатый в проектах Viking [38] и MGS [50], с 2004 по 2013 г., и позволил впервые после кратких измерений на КА "Фобос-2" [48] детально исследовать его вертикальное распределение [76–80]. В настоящее время SPICAM — единственный прибор, измеряющий вертикальное распределение водяного пара, так как соответствующий канал лимбового радиометра MCS на КА MRO [55] неработоспособен.

Водяной пар в атмосфере на Mars Express измеряется не только SPICAM, но и приборами OMEGA [81] и PFS [82, 83], использующими для этого различные диапазоны и полосы поглощения. Более того, несколько месяцев в 2004 г. приборы Mars Express работали одновременно с TES/MGS, данные которого [50] составляли основу климатологии Марса. Мы провели сравнение измерений и методов [84, 85], что привело к коррекции данных Viking [86] и TES/MGS [87], а также позволило согласовать между собой данные трёх экспериментов.

Главной задачей атмосферных измерений ПФС является термическое зондирование атмосферы в полосе 15 мкм CO_2 . Используя участки полосы, в которых оптическая толщина газа различна и излучение на соответствующих длинах волн приходит от различных слоёв атмосферы, можно, решив обратную задачу, восстановить вертикальный профиль температуры атмосферы. По этому принципу работают и метеорологические приборы на орбите Земли. Данные термического зондирования дают основу для понимания современного климата планеты и служат для настройки моделей общей циркуляции атмосферы. Впервые проведённые на КА Mariner-9 [37], такие измерения выполнялись затем приборами TES/MGS [50] и ПФС [88, 89]. С 2005 г. тер-

мическое зондирование ведёт также лимбовый радиометр MCS/MRO [56]. Таким образом, мониторинг климата Марса продолжается непрерывно с 1998 г., перекрывая период более семи марсианских лет. Но наиболее ярким открытием ПФС является обнаружение метана в атмосфере Марса.

6. Метан в атмосфере Марса

В отличие от водяного пара, содержание которого в земной атмосфере существенно снижается с увеличением высоты, облегчая ИК-наблюдения на высокогорных обсерваториях, метан в атмосфере Земли обилен и перемешан равномерно. Его наблюдения очень трудны, поскольку требуют высокого спектрального разрешения и одновременно максимального доплеровского сдвига для детектирования марсианских линий поглощения. Первая статья о детектировании метана опубликована В.А. Краснополским по данным наземной фурье-спектрометрии с разрешающей силой ≈ 180000 [90], но появление на околосарсианской орбите спектрометра PFS с разрешением $\approx 1,5 \text{ см}^{-1}$, в спектральный диапазон которого попадает фундаментальная полоса метана $3,3 \text{ мкм}$ (см. таблицу), оказало, несомненно, стимулирующее влияние на астрономические наблюдения и их анализ.

В 2004 г. сразу три независимые группы заявили о детектировании метана [52, 90, 91]. Количество газа в атмосфере составило около 10 ppb (10^{-8} объёмных частей). Метан в атмосфере Марса распадается под действием УФ-излучения (в основном солнечного L- α) и время его жизни составляет около 300 лет. Для сохранения газа в атмосфере даже в таких малых количествах необходим постоянно действующий источник. В статье [90] рассматриваются различные возможные источники пополнения метана: вулканический, метеоритный (или кометный) и биологический — и наиболее вероятной гипотезой признается наличие разреженных колоний микроорганизмов-метаногенов на поверхности Марса. В статье [52] не исключается, наряду с биологической, вулканическая гипотеза, а также возможность выхода в атмосферу ископаемого метана, образовавшегося в результате магматических процессов, низкотемпературного синтеза (серпентизации, что подкрепляется недавним обнаружением минерала серпентина на Марсе [54]) или биологических процессов ранее в истории Марса.

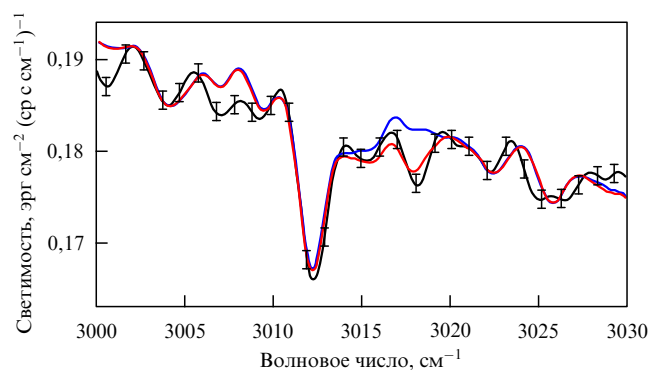


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Средний спектр, зарегистрированный прибором ПФС (чёрная кривая с погрешностями). Q-ветвь фундаментальной полосы метана находится на частоте 3018 см^{-1} . Показаны два синтетических спектра, для содержания метана 50 ppb (красная кривая) и 0 ppb (синяя кривая). (Из работы [93].)

Все наблюдения метана находятся на пределе детектирования. Так, спектры ПФС в окрестности наблюдаемой Q-ветви фундаментальной полосы метана демонстрируют множество особенностей, не совпадающих с синтетическим спектром (рис. 2); данные группы М. Муммы пересматривались несколько раз, окончательная статья [92] опубликована лишь в 2009 г. Другой проблемой этих наблюдений стала переменность метана: измеряемое ПФС количество газа постоянно меняется [93, 94], а астрономическими методами метан был зарегистрирован [95, 96] лишь в 2003 г. В связи с этим сам факт детектирования ставится под сомнение [97]. Действительно, фотохимическое время жизни метана, очень короткое на геологическом масштабе времени, достаточно для его полного перемешивания в атмосфере процессами циркуляции. Как показано в работе [98], переменность метана не объясняется известными процессами атмосферной физики и химии. Пока метан у поверхности Марса не удалось обнаружить и миссии Curiosity [99]. Обнаружение метана инициировало огромное число гипотез о его происхождении, источниках и стоках. Значение этого открытия таково, что к 2010 г. со всей серьёзностью встал вопрос о специальной орбитальной миссии, посвящённой малым атмосферным составляющим [100].

7. Космические спектрометры высокого разрешения для планетных исследований

Чувствительные измерения малых атмосферных газов в разрежённой атмосфере Марса требуют создания приборов высокого спектрального разрешения в оптимальном диапазоне (см. раздел 2). В космических исследованиях атмосферы классическим решением является фурье-спектрометр с большой оптической разностью хода [101–104]. Довольно большая масса таких приборов, от 50 до 150 кг, исключает их использование в межпланетных проектах, даже в специальных "атмосферных" миссиях. Для решения задачи высокого спектрального разрешения в "малом" формате мы предложили использовать комбинацию эшелле-спектрометра и акустооптического фильтра [105, 106] (рис. 3). Прибор, основанный на этом принципе, для исследования надоблачной атмосферы Венеры в проекте Venus Express был построен в Бельгии [107], затем эксперимент по исследованию парниковых газов в атмосфере Земли был поставлен на Международной космической станции [108]. При спектральной разрешающей силе $20000\text{--}25000$ масса этих приборов составила $3\text{--}5 \text{ кг}$. Аналогичный прибор для

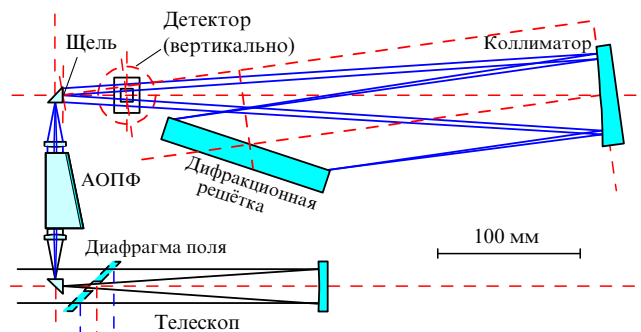


Рис. 3. Оптическая схема спектрометра SOIR (Solar Occultation InfraRed) на основе комбинации эшелле-спектрометра по схеме Литтрова и АОПФ для селекции порядков дифракции.

исследования атмосферы Марса и поиска метана был создан для российского проекта "Фобос–Грунт" [109]. Другим возможным путём является уменьшение размеров фурье-спектрометров [110].

На основе этих технических решений планируются эксперименты на спутнике Trace Gas Orbiter (TGO) космического проекта ExoMars (Exobiology on Mars) [100], реализуемого совместно Роскосмосом и Европейским космическим агентством. Для установки на борт создаётся европейский комплекс NOMAD (Nadir and Occultation for MArS Discovery), состоящий из двух спектрометров типа SOIR и миниатюрного УФ-спектрометра [111], и российский комплекс ACS (Auto-Correlation Spectrometer) [112], состоящий из спектрометра типа SOIR, предназначенного для ближнего ИК-диапазона спектра, спектрометра с использованием скрещённой дисперсии, предназначенного для среднего ИК-диапазона, и фурье-спектрометра. В спектральном диапазоне, соответствующем метану, планируется достичь разрешающей силы не менее 50000. Мы рассчитываем, что такая комбинация приборов не только поможет разгадать загадку метана, но и позволит продолжить мониторинг климата Марса.

8. Заключение

В нашем обзоре [113] на сходную тему было высказано предположение, что Марс потерял атмосферу на раннем этапе эволюции, парниковый эффект мог работать лишь кратковременно. В целом подтверждая этот вывод, последние данные показывают, что период, в который вода была обильна на поверхности Марса, продолжался всё же не менее 500–700 млн лет. За это время углекислота атмосферы могла быть связана в отложениях карбонатов и, возможно, смогли зародиться или развиться из занесённых спор простейшие формы жизни.

Сохранилась ли жизнь до нашего времени в редких оазисах? Обнаружить её следы будет трудно, но дальнейшие исследования проблемы метана, его надёжное обнаружение, развитие гипотез его происхождения, измерение отношения изотопов углерода в метане могут дать ключевые ответы. С другой стороны, прекрасно сохранившаяся древняя кора Марса даёт возможность заглянуть в эпохи, следы которых давно стёрлись на Земле. Эта проблема, наряду с экзобиологией, может стать генеральной для дальнейших, более детальных, исследований. Особенно актуальной становится задача доставки грунта с Марса для детальных лабораторных анализов. Мы надеемся, что в России масштабные исследования соседней планеты, начатые недавно в совместном проекте Роскосмоса и Европейского космического агентства ExoMars, будут продолжены.

Благодарности. Создание российских приборов для проекта Mars Express и работы по сопровождению экспериментов после запуска в 2003 г., а также российское участие в проекте ExoMars финансируется Роскосмосом. Статья написана при поддержке программой Президиума РАН № 22.

Список литературы

1. Saunders R S et al. *Space Sci. Rev.* **110** 1 (2004)
2. Zurek R W, Smrekar S E *J. Geophys. Res. Planets* **112** E05S01 (2007)
3. Squyres S W et al. *J. Geophys. Res. Planets* **108** 8062 (2003)
4. Grotzinger J P et al. *Space Sci. Rev.* **170** 5 (2012)
5. Acuña M H et al. *Science* **284** 790 (1999)
6. Smith D E et al. *J. Geophys. Res. Planets* **106** 23689 (2001)
7. Neukum G et al. *Earth Planet. Sci. Lett.* **294** 204 (2010)
8. Neukum G et al. *Earth Planet. Sci. Lett.* **294** 183 (2010)
9. Boynton W V et al. *Science* **297** 81 (2002)
10. Mitrofanov I et al. *Science* **297** 78 (2002)
11. Жарков В Н, Гудкова Т В *Астрон. вестн.* **39** 387 (2005) [Zharkov V N, Gudkova T V *Solar System Res.* **39** 343 (2005)]
12. Rossi A P et al. *J. Geophys. Res. Planets* **113** E08016 (2008)
13. Neukum G et al. *Nature* **432** 971 (2004)
14. Christensen P R et al. *Science* **300** 2056 (2003)
15. Carr M H *Nature* **326** 30 (1987)
16. Zuber M T et al. *Geophys. Res. Lett.* **25** 4393 (1998)
17. Carr M H, Head J W *J. Geophys. Res. Planets* **108** 5042 (2003)
18. Squyres S W et al. *Science* **306** 1709 (2004)
19. Morris R V et al. *Science* **329** 421 (2010)
20. Head J W et al. *Space Sci. Rev.* **96** 263 (2001)
21. Laskar J, Robutel P *Nature* **361** 608 (1993)
22. Laskar J et al. *Icarus* **170** 343 (2004)
23. Fastook J L et al. *Icarus* **198** 305 (2008)
24. Жарков В Н *Астрон. вестн.* **30** 514 (1996) [Zharkov V N *Solar Syst. Res.* **30** 456 (1996)]
25. Babeyko A Y, Zharkov V N *Phys. Earth Planet. Interiors* **117** 421 (2000)
26. Malin M C, Edgett K S *Science* **288** 2330 (2000)
27. Greeley R et al. *J. Geophys. Res. Planets* **110** 6002 (2005)
28. Basilevsky A T et al. *Planet. Space Sci.* **57** 917 (2009)
29. Hord C W, Barth C A, Pearce J B *Icarus* **12** 63 (1970)
30. Hanel R A et al. *Icarus* **12** 48 (1970)
31. Мороз В И, Парфентьев Н А *Космич. исслед.* **13** 80 (1975) [Moroz V I, Parfent'ev N A *Cosmic Res.* **13** 68 (1975)]
32. Мороз В И, Ксанфомалити Л В, Наджип А Э *УФН* **111** 369 (1973) [Moroz V I, Ksanfomaliti L V, Nadzhip A É *Sov. Phys. Usp.* **16** 741 (1974)]
33. Ксанфомалити Л В, Мороз В И, Дольфюс А *Космич. исслед.* **13** 92 (1975) [Ksanfomaliti L V, Moroz V I, Dollfus A *Cosmic Res.* **13** 79 (1975)]
34. Мороз В И, Наджип А Э *Космич. исслед.* **13** 738 (1976) [Moroz V I, Nadzhip A É *Cosmic Res.* **13** 658 (1976)]
35. Краснополянский В А, Крысько А А, Рогачев В Н *Космич. исслед.* **13** 37 (1975) [Krasnopol'skii V A, Krysko A A, Rogachev V N *Cosmic Res.* **13** 31 (1975)]
36. Barth C A et al. *Science* **179** 795 (1973)
37. Conrath B et al. *J. Geophys. Res.* **78** 4267 (1973)
38. Jakosky B M, Farmer C B *J. Geophys. Res.* **87** 2999 (1982)
39. Kieffer H H et al. *J. Geophys. Res.* **82** 4249 (1977)
40. Kieffer H H *J. Geophys. Res.* **84** 2793 (1979)
41. Christensen P R et al. *J. Geophys. Res. Planets* **108** 8064 (2003)
42. Ruff S W et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E12S18 (2006)
43. Smith M D et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E12S13 (2006)
44. Bibring J-P et al. *Nature* **341** 591 (1989)
45. Moroz V I, Petrova E V, Ksanfomaliti L V *Planet. Space Sci.* **41** 569 (1993)
46. Blamont J E et al. *Planet. Space Sci.* **39** 175 (1991)
47. Korablev O I et al. *Icarus* **102** 76 (1993)
48. Rodin A V, Korablev O I, Moroz V I *Icarus* **125** 212 (1997)
49. Christensen P R et al. *J. Geophys. Res. Planets* **106** 23823 (2001)
50. Smith M D *Icarus* **167** 148 (2004)
51. Bibring J-P et al. *Science* **312** 400 (2006)
52. Formisano V et al. *Science* **306** 1758 (2004)
53. Ehlmann B L et al. *Science* **322** 1828 (2008)
54. Ehlmann B L, Mustard J F, Murchie S L *Geophys. Res. Lett.* **37** L06201 (2010)
55. McCleese D J et al. *J. Geophys. Res. Planets* **112** E05S06 (2007)
56. McCleese D J et al. *J. Geophys. Res. Planets* **115** E12016 (2010)
57. Heavens N G et al. *J. Geophys. Res. Planets* **116** E04003 (2011)
58. Poulet F et al. *Nature* **438** 623 (2005)
59. Murchie S et al. *J. Geophys. Res. Planets* **112** E05S03 (2007)
60. Кorableв О И, Берто Ж Л *Астрон. вестн.* **37** 483 (2003) [Korablev O I, Bertaux J-L *Solar Syst. Res.* **37** 441 (2003)]

61. Bertaux J-L *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S01 (2006)
62. Chang I C *Appl. Phys. Lett.* **25** 370 (1974)
63. Korablev O et al. *Adv. Space Res.* **29** 143 (2002)
64. Korablev O et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S03 (2006)
65. Formisano V et al. *Planet. Space Sci.* **53** 963 (2005)
66. Bertaux J-L et al. *Nature* **435** 790 (2005)
67. Bertaux J-L et al. *Science* **307** 566 (2005)
68. Bertaux J L et al. *J. Geophys. Res. Planets* **117** E00J04 (2012)
69. Fedorova A A et al. *Icarus* **219** 596 (2012)
70. Fedorova A et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S07 (2006)
71. Perrier S et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S06 (2006)
72. Lebonnois S et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S05 (2006)
73. Lefèvre F et al. *Nature* **454** 971 (2008)
74. Head J W et al. *Nature* **434** 346 (2005)
75. Levrard B et al. *Nature* **431** 1072 (2004)
76. Fedorova A et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S08 (2006)
77. Trokhimovskiy A et al., in *39th COSPAR Scientific Assembly, 14–22 July 2012, Mysore, India*, Abstract D2.1-19-12, p. 2005
78. Fedorova A A et al. *Icarus* **200** 96 (2009)
79. Maltagliati L et al. *Science* **333** 1868 (2011)
80. Maltagliati L et al. *Icarus* **223** 942 (2013)
81. Maltagliati L et al. *Icarus* **213** 480 (2011)
82. Fouchet T et al. *Icarus* **190** 32 (2007)
83. Tschimmel M et al. *Icarus* **195** 557 (2008)
84. Korablev O et al., in *Second Workshop on Mars Atmosphere Modelling and Observations, February 27–March 3, 2006, Granada, Spain* (Eds F Forget et al.) (Paris, 2006) p. 244
85. Korablev O, in *37th COSPAR Scientific Assembly, 13–20 July 2008, Montréal, Canada*, p. 1580
86. Fedorova A A et al. *Icarus* **208** 156 (2010)
87. Smith M D *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **36** 191 (2008)
88. Засова Л В и др. *Космич. усьлэд.* **44** 319 (2006) [Zasova L V et al. *Cosmic Res.* **44** 305 (2006)]
89. Wolkenberg P et al. *Icarus* **215** 628 (2011)
90. Krasnopolsky V A, Maillard J P, Owen T C *Icarus* **172** 537 (2004)
91. Mumma M J et al. *Bull. Am. Astron. Soc.* **36** 1127 (2004)
92. Mumma M J et al. *Science* **323** 1041 (2009)
93. Geminale A, Formisano V, Giuranna M *Planet. Space Sci.* **56** 1194 (2008)
94. Geminale A, Formisano V, Sindoni G *Planet. Space Sci.* **59** 137 (2011)
95. Krasnopolsky V A *Icarus* **217** 144 (2012)
96. Villanueva G L et al. *Icarus* **223** 11 (2013)
97. Zahnle K, Freedman R S, Catling D C *Icarus* **212** 493 (2011)
98. Lefèvre F, Forget F *Nature* **460** 720 (2009)
99. Webster C R et al. *LPI Contrib.* (1719) 1366 (2013)
100. Zurek R W et al. *Planet. Space Sci.* **59** 284 (2011)
101. Abrams M C et al. *Appl. Opt.* **35** 2774 (1996)
102. von Clarmann T et al. *J. Geophys. Res. Atmos.* **108** 4736 (2003)
103. Bernath P F et al. *Geophys. Res. Lett.* **32** L15S01 (2005)
104. Kasuya M, Nakajima M, Hamazaki T *Trans. Space Technol. Jpn.* **7** (ists26) To_4_5 (2009)
105. Korablev O I, Bertaux J-L, Vinogradov I I *Proc. SPIE* **4818** 272 (2002)
106. Korablev O I et al., in *Proc. of the 5th Intern. Conf. on Space Optics, ICSSO 2004, 30 March–2 April 2004, Toulouse, France* (ESA SP-554, Ed. B Warmbein) (Noordwijk: ESA Publ. Division, 2004) p. 73
107. Nevejans D et al. *Appl. Opt.* **45** 5191 (2006)
108. Кораблев О И и др. *Оптич. журн.* **78** (5) 44 (2011) [Korablev O I et al. *J. Opt. Technol.* **78** 317 (2011)]
109. Korablev O et al. *Appl. Opt.* **52** 1054 (2013)
110. Кораблев О И и др. *Астрон. весн.* **46** 34 (2012) [Korablev O I et al. *Solar Syst. Res.* **46** 31 (2012)]
111. Drummond R et al. *Planet. Space Sci.* **59** 292 (2011)
112. Korablev O et al., in *39th COSPAR Scientific Assembly, 14–22 July 2012, Mysore, India*, Abstract E2.6-22-12, p. 969
113. Кораблев О И *УФН* **175** 655 (2005) [Korablev O I *Phys. Usp.* **48** 626 (2005)]

PACS numbers: **07.57**, – c, **84.40**, – x, **89.20**, – a
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201307i.0769

Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований

А.В. Ипатов

1. Введение

Институт прикладной астрономии РАН разработал проект четырёхэлементного радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) для проведения фундаментальных и прикладных исследований. РСДБ-наблюдения, выполненные на этом интерферометре, позволят определять параметры вращения Земли (ПВЗ) и координаты станций на миллиметровом уровне точности, а также оперативно определять всемирное время в интересах Глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС).

Основные научные задачи фундаментального координатно-временного и навигационного обеспечения, для решения которых предназначены радиоинтерферометры, следующие:

- построение и поддержание небесной опорной системы координат в виде каталогов координат внегалактических радиосточников;

- построение и поддержание земной опорной системы координат в виде каталогов координат и скоростей опорных станций;

- определение параметров взаимной ориентации земной и небесной опорных систем координат — параметров вращения Земли;

- построение динамических систем координат в виде эфемерид тел Солнечной системы и космических аппаратов;

- уточнение национальной шкалы координированного времени UTC(SU) и поддержание её в заданных пределах по отношению к шкале всемирного координированного времени UTC;

- построение моделей распространения сигналов в атмосфере и ионосфере.

Следует отметить, что в настоящее время требования к точности и оперативности координатно-временного и навигационного обеспечения прикладных задач часто сравнимы с требованиями фундаментального координатно-временного обеспечения. Так, например, навигационные определения по сигналам ГЛОНАСС должны выполняться с итоговой погрешностью не более 30 см. При этом погрешность за счёт фундаментального сегмента не должна превышать 3 см. Для достижения такой точности навигационных определений комплекс средств определения и прогнозирования параметров вращения Земли должен обеспечивать точность определения 0,1 мс дуги для координат полюса, углов нутации и прецессии и 10 мкс для всемирного времени [1]. Причём частота получения данных должна быть не реже 3–4 раз в сутки. Наиболее отчётливо это подтверждается целевыми инди-

А.В. Ипатов. Институт прикладной астрономии РАН,
Санкт-Петербург, РФ
E-mail: ipatov@ipa.nw.ru