

УДК: 520.6; 523.4–1; 523.43; 523.43–1/-8; 523.43–852

КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ПОСАДОЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ ЭКЗОМАРС-2022

© 2024 г. О. И. Кораблев^{а, *}, Д. С. Родионов^{а, **}, Л. М. Зеленый^{а, ***}

^а Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

* korab@cosmos.ru

** rodionov@cosmos.ru

*** lzelenyi@cosmos.ru

Поступила в редакцию 17.08.2023 г.

После доработки 05.09.2023 г.

Принята к публикации 13.09.2023 г.

Представлены научные задачи, приборы и программа измерений комплекса научной аппаратуры стационарной посадочной платформы “Казачок” проекта Госкорпорации Роскосмос и Европейского космического агентства (ESA) ЭкзоМарс-2022. Научные задачи исследований на посадочной платформе включали долговременный мониторинг климата, исследования состава атмосферы, механизмов подъема пыли и связанных электрических явлений, взаимодействий между атмосферой и поверхностью, распространённости воды в подповерхностном слое, мониторинг радиационной обстановки и изучение внутреннего строения Марса. Для решения этих задач были созданы, испытаны и интегрированы в состав космического комплекса 11 российских и два европейских прибора общей массой 45 кг. В их числе система телевизионных камер, метеоконтакты, комплекс для исследования пыли и связанных с ней электрических явлений, оптические спектрометры и аналитический комплекс для исследования состава атмосферы, микроволновый радиометр, нейтронный и гамма-спектрометры для исследования поверхности, сейсмометр, магнитометры и эксперимент по определению собственного движения Марса для исследования внутреннего строения. Хотя проект ЭкзоМарс-2022 прекращён, научные задачи комплекса не утратили актуальности, а технические решения и разработки, реализованные в научной аппаратуре, представляют интерес и перспективны для дальнейших исследований Марса.

Ключевые слова: Марс, приборы космических исследований, атмосфера, пыль, поверхность, магнитное поле, внутреннее строение, метеорология, дозиметрия

DOI: 10.31857/S0320930X24010011, **EDN:** OIHISN

ВВЕДЕНИЕ

В недавних номерах журнала “Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы” начата публикация серии статей, посвящённых экспериментам, подготовленным для посадочной платформы “Казачок” (Москатиных и др., 2020а; 2020б) проекта Госкорпорации Роскосмос и Европейского космического агентства (ESA) ЭкзоМарс-2022 (Vago и др., 2015а). Запуск автоматической межпланетной станции, состоящей из европейского перелётного модуля, российского десантного модуля с посадочной платформой (ПП) и европейским ровером, планировался в сентябре 2022 г. с космодрома Байконур ракетой-носителем Протон-М с разгонным блоком Бриз-М.

Посадка должна была состояться в 2024 г. в район равнины Оксия (Oxia Planum), которая расположена вблизи экватора в северном полу-

шарии Марса, к востоку от равнины Хриса, на границе высокогорных регионов и низменностей (Vago и др., 2015б; Иванов и др., 2020). Район посадки — эллипс 120×19 км внутри неглубокого кратера. Здесь на поверхность выходят филлосиликаты (глинистые породы), обогащенные железом и магнием. Над ними лежит слой вещества, возможно, вулканического происхождения, который подвергался эрозии на протяжении последних 100 млн лет. Нижний слой, по имеющимся данным, не претерпевал изменений, связанных с температурным режимом или метаморфизмом. Внутри эллипса посадки нет существенных возвышенностей, и он имеет достаточно ровный для посадки рельеф.

По причинам, не связанным с научными или техническими проблемами, весной 2022 г. международная кооперация ЭкзоМарс была разорвана и запуск не состоялся. В то же время научная

аппаратура была полностью подготовлена, испытана и интегрирована на ПП. Научные задачи комплекса не утратили актуальности, а технические решения и разработки, реализованные в научной аппаратуре, представляют интерес и перспективны для дальнейших исследований Марса.

Научные задачи комплекса научной аппаратуры (КНА) и его состав, соответствующий ранней стадии проекта (до 2014 г.), был представлен в публикации (Zelenyi и др., 2015). С тех пор научные задачи и состав КНА претерпели существенные изменения. Прежде всего, было принято решение отказаться от забора образцов грунта при помощи руки-манипулятора и их анализа в бортовой аналитической лаборатории на основе газового хроматографа и масс-спектрометра. Наиболее оптимально было бы решать эту задачу с подвижной платформы — ровера Rosalind Franklin (Vago и др., 2017). Кроме того, состав КНА был дополнен рядом европейских приборов и датчиков, выбранных по результатам международного конкурса, завершившегося в ноябре 2015 г. Были выбраны два европейских прибора — LaRa и HABIT, в состав российских приборов — MAIGRET, MTK и ПК вошли европейские блоки и датчики. Таким образом было сбалансировано взаимное участие

партнеров по международной кооперации в двух сегментах проекта, ровера Rosalind Franklin с преимущественно европейской научной аппаратурой и ПП “Казачок” — с преимущественно российской. Состав научной аппаратуры ровера и ПП представлен на рис. 1. Фотография ПП с установленным ровером в процессе сборки приведена на рис. 2. Приборы КНА в основном размещены на уровне палубы ПП справа и слева от ровера.

Цель серии публикаций и настоящей статьи — представить состояние КНА по итогам завершения разработки и испытаний ПП в 2022 г. В состав КНА входило 13 приборов (36 блоков) общей массой (включая кабельную систему) ≤45 кг.

К моменту написания статьи в “Астрономическом вестнике” (2022–2023 гг.) опубликовано семь статей, посвященных приборам и датчикам КНА ПП. Еще шесть статей с достаточно полным описанием приборов КНА опубликованы в других изданиях (ссылки на соответствующие публикации приведены в табл. 2). К сожалению, современные и подробные описания трех приборов и главного метеоконспекса КНА пока отсутствуют. Мы надеемся, что они появятся в ближайшее время, а данная публикация сможет частично компенсировать недостаток информации.

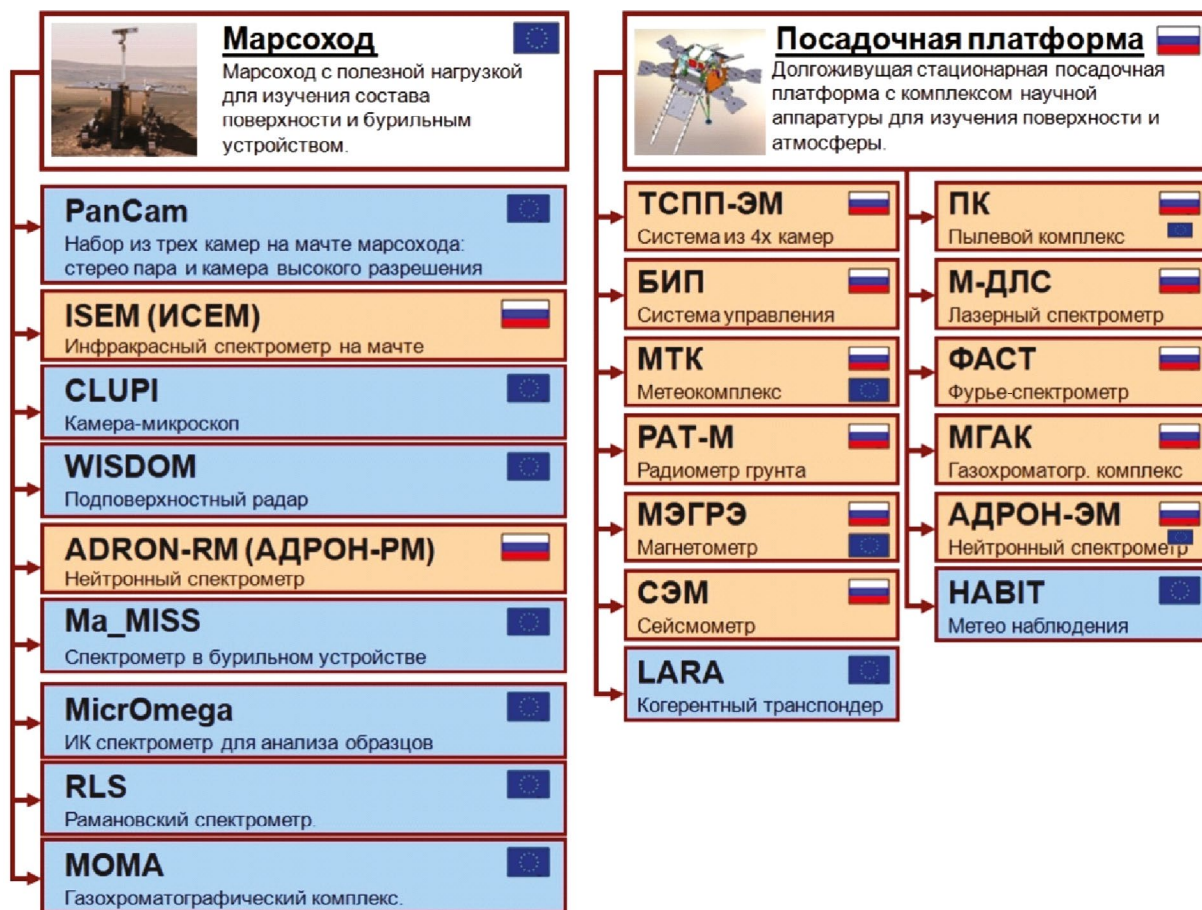


Рис. 1. Научные приборы ровера Rosalind Franklin и посадочной платформы “Казачок”.

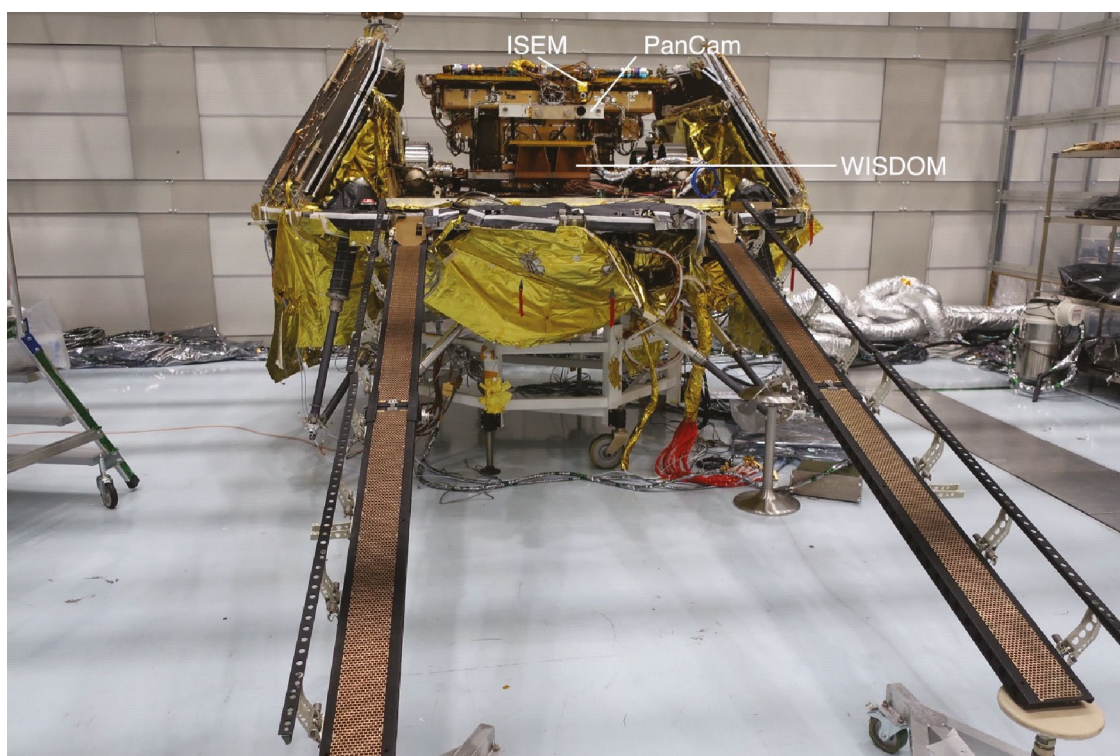


Рис. 2. Посадочная платформа и ровер в процессе сборки на предприятии TAS-I (Турин, Италия). Отмечены оптические блоки прибора ровера PanCam и ISEM и антенна радара WISDOM. Фото ИКИ РАН.

Научные задачи КНА обсуждаются в разделе “Научные задачи”, краткие сведения о приборах комплекса собраны в разделе “Научные эксперименты...”, примеры сценариев измерений комплекса приведены в разделе “План проведения...”.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

Неподвижные посадочные платформы неоднократно и успешно использовались в истории исследований Марса: проекты NASA Viking-1, -2, Pathfinder, Phoenix, InSight. До появления подвижных платформ они выполняли, прежде всего, исследовательские и, в меньшей степени, мониторинговые задачи (Viking, Phoenix). В последние годы акцент смещается в сторону мониторинга (InSight). Неподвижная платформа — несомненно, лучший вариант для проведения метеорологического и геофизического мониторинга. При этом ряд важнейших исследовательских задач, связанных с исследованием атмосферы и взаимодействий атмосфера—поверхность, также целесообразно решать на неподвижной платформе. Объединение задач исследований поверхности и атмосферы, даже с использованием самой совершенной аппаратуры, приводит к неизбежным компромиссам при планировании экспериментов, снижению приоритета атмосферных исследований. В то же время в исследовании состава

поверхности, обитаемости, поисках признаков жизни, дистанционно или путем забора и анализа образцов грунта, подвижность, возможность выбора места для анализов являются ключевыми преимуществами. Эти соображения принимались во внимание при формулировке научных задач и выборе научной аппаратуры ПП “Казачок” и разделения задач между ПП и ровером Rosalind Franklin.

При планировании миссии (Zelenyi и др., 2015), ставились следующие научные задачи ПП: (1) длительный мониторинг климатических условий на поверхности Марса в месте посадки; (2) изучение состава марсианской атмосферы с поверхности; (3) изучение взаимодействия атмосферы и поверхности; (4) изучение состава поверхности; (5) изучение внутреннего строения Марса; (6) мониторинг радиационной обстановки и других факторов. С учетом упомянутых изменений акцентов, научные задачи исследований на посадочной платформе к моменту ее готовности можно сформулировать следующим образом:

1. Долговременный мониторинг климата.
2. Исследования состава атмосферы.
3. Исследования механизмов подъема пыли и связанных электрических явлений.
4. Исследование взаимодействий между атмосферой и поверхностью.
5. Изучение распространенности воды в подповерхностном слое.

- 6. Мониторинг радиационной обстановки.
 - 7. Изучение внутреннего строения Марса.
- Список научных экспериментов и их соответствие научным задачам приведены в табл. 1. Порядок экспериментов в таблице приблизительно соответствует порядку научных задач.

Таблица 1. Соответствие научных задач ПП ЭкзоМарс и научных экспериментов

Приборы	Научные задачи					
	Мониторинг климата	Состав атмосферы	Пыль и атмосферное электричество	Атмосфера/поверхность	Подповерхностная вода	Радиационная обстановка
ТСПП-ЭМ Телевизионная система	×		×	×		
МТК Метеокомплекс	•	×	×	×		
НАВИТ Метеокомплекс	•	×	×	×		
ПК пылевой комплекс	×		•	×		
ФАСТ Фурье-спектрометр	×	•	×	×		
МГАК газоаналитический комплекс		•		×		
М-ДЛС лазерный спектрометр		×		•		
РАТ-М радиометр	×		×	•	×	
АДРОН-ЕМ Нейтронный и гамма-спектрометр с активацией; дозиметр				×	•	×
MAIGRET, ARM			×		×	•
Магнитометры						•
СЕМ Сейсмометр						•
LARA радиомаяк						•

Примечание: • — основная научная задача, × — дополнительные научные задачи.

Научные задачи, связанные с атмосферой

Долговременный мониторинг климата, изучение состава атмосферы и явлений, связанных с атмосферной пылью, являются ключевыми и тесно связанными научными темами ПП ЭкзоМарс. Они распадаются на следующие основные составляющие: (1) регулярный долговременный почасовой мониторинг основных метеорологических параметров (температура, давление, скорость и направление ветра, запыленность и влажность), создающий основу для настройки и валидации моделей общей циркуля-

ции атмосферы Марса; (2) регулярные измерения атмосферных газов, включая инертные, и их изотопологов для выяснения суточной и сезонной динамики состава атмосферы вблизи поверхности Марса и взаимодействия атмосферы с грунтом, выяснения изотопных соотношений летучих элементов в различных резервуарах; (3) изучение структуры атмосферы и динамики пограничного планетного слоя при спуске десантного модуля и с поверхности при помощи дистанционных методов; исследование динамики приповерхностного слоя атмосферы; (4) исследование механизма подъема и процессов переноса пыли, включая измерения импульса пылевых частиц вблизи поверхности одновременно с их размерами и регистрацией связанных электрических явлений.

В составе аппаратуры многочисленных аппаратов, достигших поверхности Марса, было несколько полноценных метеостанций: Viking Lander (VL) –1, –2 (Chamberlain и др., 1976), Phoenix (Taylor и др., 2008), роверы Curiosity и Perseverance (Gómez-Elvira и др., 2012; Rodriguez-Manfredi и др., 2021) и платформа Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport (InSight) (Spiga и др., 2018). На Mars Pathfinder и ровере Zhurong также присутствовали элементы метеокомплексов (Seiff и др., 1997; Liu и др., 2022). Особую ценность представляют длинные ряды наблюдений, и до недавних пор записи давления с VL-1, -2 (Hess и др., 1980) были главным средством калибровки моделей общей циркуляции атмосферы Марса. Богато оснащенная разнообразными метеодатчиками с большой степенью дублирования, ПП ЭкзоМарс обеспечила бы достойный вклад в исследования марсианской метеорологии.

Регулярные измерения малых и обильных составляющих атмосферы Марса и их изотопологов дают понимание деталей основных климатических циклов Марса – углекислоты, пыли и воды. До 30% основной составляющей атмосферы, CO₂, зимой конденсируется на полярных шапках, вызывая соответствующие колебания давления и изменения относительного содержания неконденсирующихся составляющих (Ar, N₂, CO). Вода, представленная в атмосфере Марса в следовом количестве, играет тем не менее ключевую роль в химических превращениях в атмосфере, предотвращая фотолитическое разрушение CO₂, образует конденсационные облака, регулирующие нагрев атмосферы, и на длительных масштабах времени обеспечивает миграцию ледников по поверхности Марса (Montmessin и др., 2017). Адсорбция и десорбция воды в верхнем слое грунта – слабо изученный процесс, по-видимому, выполняющий в водяном цикле роль трения (Jakosky

и др., 1997; Navarro и др., 2014). Орбитальные аппараты вокруг Марса — Mars Express (MEx), Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) — ведут регулярный мониторинг основных и хорошо известных малых составляющих (CO_2 , CO , H_2O , O_3) дистанционными методами (см., например, Smith и др., 2017; 2021; Knutsen и др., 2022; Lefèvre и др., 2021). Измерения на поверхности с помощью спектроскопической и газоаналитической аппаратуры (М-ДЛС, МГАК, датчики озона SIS, HABIT) позволили бы надежно привязать дистанционные измерения к поверхности, оценить временные масштабы суточного и сезонного взаимодействия атмосфера—поверхность.

Измерение изотопных отношений водорода, кислорода и углерода в водяном паре и CO_2 в процессе обмена атмосфера—поверхность позволит, помимо уточнения их значений, известных в основном по результатам дистанционных измерений (например, Alday и др., 2021a; 2021b) и единичным измерениям на поверхности (Webster и др., 2013), выявить различия между атмосферным и поверхностным резервуарами летучих. Наконец, измерения инертных газов и их изотопов имеют очень высокий приоритет: по ним можно судить о далекой истории атмосферы и летучих на Марсе, а измерения на поверхности были проведены только на ровере Curiosity (или Mars Science Laboratory, MSL) (Mahaffy и др., 2013; Wong и др., 2013; Atreya и др., 2013; Conrad и др., 2016).

Исследование атмосферы в процессе спуска десантного модуля — необходимая задача проекта. Она тесно связана с техническими проблемами входа спускаемой капсулы в атмосферу и спуска десантного модуля. Значения плотности верхней атмосферы могут кратно отличаться от моделей, и неудивительно, что более двух третей посадок на Марс закончились неудачей. Нам известно 11 атмосферных профилей, измеренных в процессе спуска: Марс-6 (Авдеевский и др., 1975), VL-1, -2 (Seiff, Kirk, 1977), Mars Pathfinder, (Magalhães, 1999), Mars Exploration Rovers (Opportunity и Spirit; MER; Withers, Smith, 2006), Phoenix (Blanchard, Desai, 2011), MSL (Holstein-Rathlou и др., 2016), ExoMars-2016 Schiaparelli (Aboudan и др., 2018), InSight (Karlgaard и др., 2021) и Perseverance (Karlgaard и др., 2023). Для реконструкции спускаемого профиля в проекте были предусмотрены измерения замедления в процессе торможения спускаемой капсулы с использованием данных инерциального блока космического аппарата, эксперимента AMELIA (Ferri и др., 2019), и при помощи акселерометров МТК. Измеряется плотность атмосферы, из которой можно получить давление и температуру в гидростатическом приближении. Из данных

акселерометра может быть получена также горизонтальная скорость ветра. После раскрытия парашюта измерения температуры и давления планировались при помощи датчиков МТК.

Мониторинг и исследование планетарного пограничного слоя (ППС) также относится к числу задач, имеющих высокую значимость для дальнейшего освоения Марса и перспективных пилотируемых экспедиций (Petrosyan и др., 2011; Read и др., 2017). Динамика атмосферы в приповерхностном слое тесно связана со следующей задачей: измерения ветра и понимание механизмов, определяющих приповерхностные ветра, лежат в основе исследования механизмов подъема и переноса пыли, инициации крупномасштабных пылевых событий. Состояние ППС в конкретных локациях уже неплохо описывается мезомасштабными динамическими моделями (см., например, Toigo и др., 2002). Для исследований погранслоя решающее значение имеют данные МТК и ПК. Эти приборы, а также система камер помогут отслеживать еще один специфический элемент климата Марса — локальные вихри или пылевые дьяволы (см., например, Kurgansky, 2022), участвующие в подъеме пыли (Neakrase и др., 2016), и, вероятно, создающие сильные электрические поля и разряды (Renno и др., 2003). В условиях пыльной бури на Земле возникают электрические поля ~ 100 кВ/м. Аналогичные поля на Марсе превысят напряженность пробоя (~ 20 кВ/м), поэтому следует ожидать разрядов, имеющих, вероятно, сильное влияние на химические превращения в атмосфере и даже на обитаемость поверхности (Atreya и др., 2006; Kok, Renno, 2009). Регистрировать такие разряды могли MAIGRET и ПК. В ходе исследований Марса посадочными аппаратами и роверами детальное описание приповерхностного профиля атмосферы получено лишь однажды при помощи Фурье-спектрометра Mini-TES/Mars Exploration Rovers (MER) (Smith и др., 2006). Эксперимент ФАСТ позволил бы получать такие данные регулярно, дополняя исследования с МТК и ПК.

Как уже упоминалось, пылевой цикл относится к основным атмосферным циклам Марса (Kahre и др., 2017). В отличие от Земли, где тепловой баланс атмосферы и, в конечном итоге, поверхности определяется преимущественно газовым поглощением (водяным паром), в слабой атмосфере Марса эту роль выполняет пыль. Она поглощает приходящее солнечное излучение в видимом диапазоне и задерживает уходящее от планеты тепловое излучение (в полосе поглощения силикатов на 9 мкм). Современная модель оптических свойств пылевых частиц, основанная главным образом на дистанционных наблюдениях, дана в работе (Wolff и др., 2009). Более

жаркое лето в южном полушарии, когда Марс ближе к Солнцу, усиливает циркуляцию и запыленность атмосферы, разогревая ее, что, в свою очередь, усиливает подъем пыли (Daerden и др., 2015). Такая положительная обратная связь периодически, в среднем один раз за три марсианских года, приводит к глобальным пылевым бурям (ГПБ), охватывающим почти все тропические и средние широты (см., например, Guzewich и др., 2020). Исторически модели общей циркуляции, описывающие климат Марса, использовали доступные измерения содержания пыли в атмосфере (Forget и др., 1999; Hartogh и др., 2005; Wilson, Hamilton, 1996). При наличии регулярных наблюдений с орбитальных и посадочных аппаратов полной оптической толщины пыли и вертикальных профилей пыли (Montabone и др., 2015), Martian Climate Database (MCD) неплохо воспроизводит состояние атмосферы в течение конкретного марсианского года или для ряда типовых сценариев. Другой класс моделей пытается параметризовать процессы подъема пыли с поверхности и описать ее транспорт циркуляционными потоками (Kahre и др., 2023; Neary, Daerden, 2018; Newman, Richardson, 2015). Параметризации опираются в основном на теоретические представления и натурные измерения в аэродинамических трубах, имитирующие условия на Марсе (см., например, Martin, Kok, 2017; Sagan, Bagnold, 1975), в том числе даже гравитацию (Musiolik и др., 2018). Хотя этому вопросу уделяется колоссальное внимание, прямые данные о сальтации, переносе, электризации пыли и разрядах в реальных условиях Марса практически отсутствуют. Недостаточное понимание процессов подъема пыли и ее переноса у поверхности приводит к тому, что самосогласованные модели пока не в состоянии воспроизвести условия возникновения ГПБ. Совместная работа ПК и МТК впервые позволила бы детально и комплексно изучить процессы подъема пыли с поверхности Марса. Дополнительно информацию о пылевых явлениях и свойствах пыли можно получить по наблюдениям с камерами ТСПП, из мониторинга электромагнитных полей MAIGRET и комбинируя данные ФАСТ в ИК-диапазоне с орбитальными измерениями (Wolff и др., 2006).

Исследования взаимодействия атмосфера–поверхность

Исследование взаимодействий между атмосферой и поверхностью тесно связано с атмосферной группой задач и примыкает к исследованиям поверхности. К таким взаимодействиям относятся уже упомянутые механизмы подъема пыли, ее обратное воздействие на поверхность и исследо-

вание пограничного слоя атмосферы. В таких исследованиях главную роль будут играть эксперименты МТК, ПК, ТСПП.

Другое направление основано на мониторинге циклов обмена летучих компонентов между атмосферой и поверхностью. В частности, измеряя содержание H_2O и отношений изотопов D/H , $^{18}O/^{17}O/^{16}O$, $^{13}C/^{12}C$ в H_2O и CO_2 вблизи поверхности в разное время суток в течение сезонного цикла можно не только уточнить физические и химические процессы, идущие между поверхностью и атмосферой, но и сделать выводы об обитаемости Марса в прошлом и настоящем (см., например, Franz и др., 2020). Ведущая роль в этих исследованиях отводилась лазерному спектрометру М-ДЛС и аналитическому комплексу МГАК. Влажность атмосферы и гидратация верхнего слоя грунта могла быть оценена датчиком влажности МТК и прибором АДРОН-ЕМ, соответственно. Вспомогательная информация о физических условиях в атмосфере, на поверхности и в верхнем слое грунта могла быть получена датчиками МТК и НАВИТ, ИК-спектрометром ФАСТ и микроволновым радиометром РАТ-М.

Изучение распространенности воды в приповерхностном слое

Вода в приповерхностном слое марсианского грунта может находиться в виде льда, в адсорбированной форме между гранулами реголита или в связанной форме в составе минералов. Наличие воды вблизи места посадки может свидетельствовать как о перспективности локации с точки зрения обитаемости и дальнейшего освоения космическими средствами, так и о геологическом прошлом планеты: гидратированные минералы могли сформироваться в водоемах раннего Марса. Информация о распределении воды может быть получена из данных радарного зондирования, однако за пределами полярных шапок, в низких и средних широтах, основным источником служат данные нейтронного мониторинга. Длительные орбитальные измерения нейтронного потока от Марса, индуцированного космическим излучением, показали наличие ядер водорода в верхних (1–2 м) слоях реголита, соответствующие массовой доле воды от единиц до 20–40% (см., например, Malakhov и др., 2022). Обнаружение льда в экваториальных широтах вероятно лишь в глубоких каньонах (Mitrofanov и др., 2022a). По данным нейтронного каротажа с активацией при помощи генератора нейтронных импульсов на MSL, массовая доля воды вдоль трассы марсохода составляла от ≤ 0.5 до $\geq 6\%$ (Mitrofanov и др., 2022b).

В проекте планировались измерения гидратации поверхности Марса на глубину 1–2 м при

помощи нейтронного детектора АДРОН-ЕМ. В первые дни после посадки прибор должен был работать совместно с ADRON-RM на ровере Rosalind Franklin (Mitrofanov и др., 2017). По мере удаления ровера от платформы и в сочетании с данными геофизического радара ровера (Ciarletti и др., 2017) такие измерения позволили бы получить приоритетную информацию о вертикальном распределении воды во всех ее формах. Влияние изменений температуры на вертикальное распределение воды предполагалось выяснить, используя оценки суточного и сезонного хода температуры на трех уровнях (до ~1 м) под поверхностью при помощи радиометра РАТ-М.

Прибор АДРОН-ЕМ также должен был дать информацию об элементном составе основных породообразующих и радиогенных элементов в ближайшей окрестности места посадки. Параллельно измеряется плотность грунта. Таким образом, эксперимент АДРОН-ЕМ мог бы выполнить научную задачу, сформулированную для первоначальной конфигурации КНА: изучение состава поверхности. Дополнительные данные о характере пород вблизи посадочного модуля можно получить из оценок электропроводности грунта магнитометрами MAIGRET и AMR.

Мониторинг радиационной обстановки

Радиационная обстановка на поверхности Марса, как современная, так и в прошлом, имеет решающее значение для обитаемости и возможности сохранения жизни на планете. Она влияет на любые потенциальные формы жизни, которые могли выжить под землей (см., например, Pavlov и др., 2010). Излучения высоких энергий и связанные с ними риски для здоровья человека во многом определяют планирование будущих пилотируемых полетов на Марс.

Марс, его верхняя атмосфера, взаимодействует с двумя видами излучения высоких энергий: галактическими космическими лучами (ГКЛ) и энергичными частицами солнечного ветра. Мониторинг этих излучений на орбите вокруг Марса ведет дозиметр Liulin-MO в составе прибора FRED/TGO (Mitrofanov и др., 2018; Semkova и др., 2021). Из-за слабости атмосферы ГКЛ и частицы солнечного ветра достигают поверхности, где производят вторичные частицы, в том числе нейтроны и гамма-кванты. Вторичные частицы образуются и в результате взаимодействия с атмосферой. Таким образом, радиационная обстановка на поверхности существенно отличается от обстановки на орбите. Первые и единственные прямые измерения радиации на поверхности Марса проведены с помощью прибора RAD на Curiosity (Hassler и др., 2012; 2014; Ehresmann

и др., 2023). На посадочной платформе ЭкзоМарс мониторинг радиационной обстановки планировался с помощью дозиметрического канала Lulin-MO прибора АДРОН-ЕМ и детекторов нейтронов и гамма-квантов самого прибора АДРОН-ЕМ.

Изучение внутреннего строения Марса

Исследование внутреннего строения Марса имеет прямое отношение к фундаментальной проблеме формирования и ранней эволюции планет Солнечной системы. Уточнение моделей внутреннего строения позволяет оценить долю летучих компонентов, собранных планетой на ранних этапах аккреции и интенсивной бомбардировки (Zharkov, 1996). С точки зрения аналогий между Землей и Марсом, не менее важны процессы дифференциации и дальнейшая эволюция недр. Марс — единственная планета, похожая на Землю, которую можно длительно изучать геофизическими методами, и неподвижные станции на его поверхности, лучше несколько, являются оптимальной платформой для таких исследований (см., например, Lognonné и др., 2000).

Основным методом исследования внутреннего строения служит сейсмометрия. Проведение таких измерений на поверхности другой планеты — сложная техническая задача. Помимо высокой чувствительности и широкой полосы частот, сейсмометр на Марсе должен быть защищен от ветра, колебаний температуры и давления, изолирован от влияния самой платформы. После неоднозначных результатов сейсмического эксперимента Viking Landers (1976–1982) (Anderson и др., 1976) и попытки на Марс-96 (Linkin и др., 1998; Lognonné и др., 1998) потребовалось более 20 лет для реализации специализированной платформы InSight (2018–2022). Вакуумированный сейсмометр SEIS, размещенный на поверхности отдельно от посадочного аппарата InSight под серьезной защитой от атмосферных влияний (Lognonné и др., 2019), зарегистрировал несколько значительных сейсмических событий и множество мелких (см., например, Giardini и др., 2020; Kawamura и др., 2023). Получен богатый материал о мощности и свойствах коры (Knapmeyer-Endrun и др., 2021), свойствах мантии (Huang и др., 2022), получен отклик от ядра (Stähler и др., 2021).

Исследования недр Марса можно было бы расширить, используя еще одну геофизическую станцию (см., например, Gudkova и др., 2014). Регистрация сейсмических событий одновременно с двух точек поверхности позволило бы получить важную информацию о неоднородности коры и мантии, перейти от профилей к 3D-структуре, восстановить которую можно в области, сравнимой с расстоянием между станциями. При этом

допустимо применение прибора даже с более скромными параметрами, нежели SEIS/InSight. Именно такая задача ставилась перед сейсмометром СЭМ ПП ЭкзоМарс, запуск которого изначально планировался на 2018 г. одновременно с InSight.

Анализ доплеровского сдвига при двусторонней радиосвязи между посадочным модулем на Марсе и наземными станциями позволяет определить параметры ориентации и вращения Марса, что дает возможность уточнить информацию о внутренней структуре, в частности, о ядре. Целевыми параметрами являются вариации скорости вращения (или продолжительности суток) и ориентации оси вращения (прецессия и нутация). Ранее такие эксперименты проводились на посадочных модулях КА Viking (Yoder, Standish, 1997) и Mars Pathfinder (Folkner и др., 1997). Попытки ограничить орбитальные параметры делались также по доплеровскому отслеживанию орбитальных аппаратов и роверов (Kuchynka и др., 2014; Konopliv и др., 2016; 2020). Эксперимент LaRa, когерентный транспондер X-диапазона, предназначался для отслеживания положения посадочного модуля с высокой точностью (Dehant и др., 2020; Le Maistre и др., 2020; Péters и др., 2020).

Магнитное поле связано с внутренней структурой планеты и с эволюцией ее атмосферы. Остаточная намагниченность коры Марса, свидетельство древнего магнитного поля, была впервые картирована MGS с 400-километровой орбиты (Асуфа и др., 1999) и дополнена измерениями с эллиптической орбиты MAVEN

(Connerney и др., 2015). Модели позволяют экстраполировать величину магнитного поля до поверхности (см., например, Langlais и др., 2019). К настоящему времени измерения магнитного поля на поверхности проведены на посадочных аппаратах InSight (Johnson и др., 2020) и ровере Zhurong (Liu и др., 2022). Поле, измеренное на месте посадки InSight, оказалось на порядок сильнее, чем предсказывала спутниковая модель (Johnson и др., 2020). Магнитные поля коры взаимодействуют с солнечным ветром, создавая переходные поля и токи в верхних слоях атмосферы Марса. На поверхности наблюдались суточные вариации, результат влияния ионосферных токов, и более высокочастотные изменения, происхождение которых пока не выяснено (Mittelholz и др., 2020). Для объяснения природы этих эффектов и древнего динамо необходимо больше данных о поверхностном магнитном поле. Кроме того, переменные поля, в сочетании с геоморфологическими и сейсмическими данными, можно использовать для исследования электропроводности марсианских недр. Измерения напряженности и направления магнитного поля на месте посадки ЭкзоМарс планировалось при помощи магнитометров MAIGRET и AMR.

НАУЧНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ
ПОСАДОЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Список научных приборов ПП ЭкзоМарс приведен в табл. 2. Их порядок соответствует табл. 1.

Таблица 2. Научные приборы КНА ПП ЭкзоМарс-2022

Прибор/ Подсистема	Принцип действия	Основные измерения	Руководитель, изготовитель	Масса/ габариты/ потребление/ информативность	Ссылка
ТСПП-ЭМ (TSPP)	Четыре цветные камеры, поле зрения каждой 115°×115°	Панорама поверхности, переменные явления	И.В. Полянский ИКИ РАН	Четыре камеры и блок электроники 5.3 кг, 12.5 Вт	Абрамов и др. (2023)
МТК (METEO)	Метеорологические датчики, датчики оптической плотности, акселерометр, лидар	Мониторинг основных параметров атмосферы, измерения на спуске (см. табл. 3)	О.И. Кораблев ИКИ РАН, Финляндия, Испания	Семь блоков 5.2 кг	См. табл. 3
НАВИТ	Датчики температуры атмосферы, поверхности, УФ-излучения	Оценка возможности образования жидких рассолов, обитаемости поверхности	J. Martín-Torres Швеция	Два блока 0.8 кг	Martín-Torres и др. (2020)
ПК	Ударные датчики пыли, нефелометр, датчики электрического поля	Свойства пыли у поверхности, подъем пыли, ее электризация	А.В. Захаров ИКИ РАН, Италия, Франция	Два блока 0.8 и 0.5 кг; штанга 0.3 кг 10 Вт 4 Мб/сол	Захаров и др. (2022)

Таблица 2. Окончание

Прибор/ Подсистема	Принцип действия	Основные измерения	Руководитель, изготовитель	Масса/ габариты/ потребление/ информативность	Ссылка
ФАСТ (FAST)	Фурье-спектрометр, анализ собственного излучения атмосферы и спектра Солнца через атмосферу (1.7–17 мкм)	Состав атмосферы, планетный пограничный слой	А.В. Шакур ИКИ РАН	3.4 кг	Shakun и др. (2017)
МГАК (MGAK)	Анализ атмосферных проб газовым хроматографом и масс-спектрометром	Состав атмосферы, включая инертные газы	М.В. Герасимов ИКИ РАН	Два блока 6.9 кг	Gerasimov и др. (2014)
М-ДЛС (M-DLS)	Анализ атмосферных проб лазерным спектрометром	Суточный и сезонный цикл водяного пара, CO ₂ , их изотопов	А.В. Родин МФТИ, ИКИ РАН	3 кг 35×19×11 см ³ 10–12 Вт 0.5 Мб/сол	Rodin и др. (2020)
RAT-M (RAT-M)	Микроволновый радиометр в трех полосах (6–15 ГГц)	Температура грунта до глубины 1 м	Д.П. Скулачев ИКИ РАН	0.6 кг 9.5×9.5×3 см ³ +антенны 2.5 Вт 0.01 Мб/сол	—
АДРОН-ЕМ (ADRON-EM)	Нейтронный и гамма-спектрометр с активацией нейронными импульсами, дозиметр	Мониторинг гидратации поверхности. Содержание породообразующих и радиогенных элементов. Мониторинг накопленной дозы	И.Г. Митрофанов ИКИ РАН, Болгария	Три блока 5.9 кг	Mokrousov и др. (2022)
МЭГРЭ (MAIGRET)	Феррозондовый магнитометр (100 Гц–20 кГц)	Напряженность и направление магнитного поля	А.В. Скальский ИКИ РАН, Чехия	Три блока 2.9 кг	Kolmasova и др. (2017)
AMR	Магниторезистивный датчик на выносной штанге	Напряженность и направление магнитного поля	М. Díaz Michelena, Испания	0.35 кг	Díaz Michelena и др. (2023)
СЭМ (SEM)	Трехосный сейсмометр	Поперечные и продольные колебания поверхности	А.Б. Манукин, ИФЗ РАН, ИКИ РАН	6 кг 25×25×35 см ³ 3.5 Вт 1 Мб/сол	Манукин и др. (2021)
LaRa	Когерентный транспондер X-диапазона	Прецессия и нутация Марса	V. Dehant, Бельгия	2.15 кг 25×8×8 см ³ +антенны 42 Вт 0 Мб/сол	Dehant и др. (2020)
БИП (BIP)	Блок интерфейсов и памяти	Управление приборами и сбор научной информации	К.В. Ануфрейчик ИКИ РАН	2.5 кг 22×19×6.6 см ³ 9 Вт <80 Мб/сол	—

Телевизионная система посадочной платформы Экзомарс ТСПП-ЭМ

Система камер ТСПП-ЭМ (TSPP) включает пять блоков, четыре камеры КАМ-О/ЭМ и устройство сбора, хранения и обработки информации БСД/ЭМ (Абрамов и др., 2023). Аппарату-

ра изготовлена в ИКИ РАН. Камеры установлены по углам посадочной платформы на высоте около 1 м. В азимутальной плоскости их оптические оси разнесены на 90°, а поля зрения (115°×115°) перекрываются, что позволяет обеспечить полный обзор линии горизонта. Начиная с удаления

в несколько метров формируется полная круговая панорама места посадки вокруг ПП. Было предусмотрено построение видеоряда изображений, в частности, съемка в процессе посадки, съемка съезда ровера с ПП или регистрация быстропротекающих явлений, таких как пылевые вихри.

Максимальное разрешение фотодетекторов камер 2048×2048 элементов изображения с возможностью кадрирования (2048×512) и бинирования (2×2) для уменьшения объема передаваемой информации. Разрядность получаемых изображений — 14 или 12 бит. Изображения могут быть получены в цвете на трех длинах волн: 450, 550 и 650 мкм (RGB) или в панхроматическом режиме. Глубина резкости — от 1 м до бесконечности. Камеры имеют измерительное качество как в отношении фотометрических, так и угловых характеристик.

Основные научные задачи, решаемые ТСПП-ЭМ, могут быть сформулированы следующим образом: в отношении поверхности Марса — геоморфологический анализ участка местности вокруг места посадки ПП с использованием панорам, полученных на поверхности и на заключительных участках спуска десантного модуля. Минералогический анализ участков поверхности через измерение спектральной яркости (цветности). В отношении атмосферы Марса — анализ свойств атмосферного аэрозоля, по наблюдениям углового распределения яркости неба, с возможностью разделить пылевую и конденсационную составляющие. Наблюдения переноса пыли по поверхности для понимания процессов сальтации. Регистрация пылевых вихрей и оценка их характеристик, размеров, скорости передвижения. Атмосферные наблюдения ТСПП-ЭМ позволили бы дополнить и расширить исследования в экспериментах МТК и ПК.

Важнейшей задачей ТСПП-ЭМ является информационная и техническая поддержка всего

проекта. Трудно представить посадку на поверхность Марса без возможности получения визуальных изображений.

Метеорологические комплексы МТК и НАВИТ

Основной метеокомплекс посадочной платформы, МТК (или МЕТЕО), состоит из двух частей: комплекса датчиков для измерений преимущественно в процессе спуска десантного модуля (МТК-Л) и, собственно, метеокомплекса с датчиками температуры, давления, ветра, влажности, пыли, освещенности для измерений на поверхности, многие из которых размещены на метеостанге (МЕТЕО Boom). Каждая часть имеет собственную систему управления и сбора информации. Кроме того, для оптимизации управления небольшими блоками в состав МТК были включены элементы, напрямую не связанные с метеорологией, — микрофон для записи звуков Марса и датчик магнитного поля AMR. В итоге МТК представляет собой сложный комплекс из многих датчиков и подсистем — в общей сложности 12 блоков — с международным участием. За интеграцию и испытания комплекса отвечал ИКИ РАН.

Прибор НАВИТ (HabitAbility: Brine Irradiation and Temperature) являлся частью европейской полезной нагрузки ПП. Состоящий из трех блоков, он был разработан и изготовлен шведской компанией Omnisys и Технологическим университетом г. Люлеа (Luleå University of Technology). Хотя главная цель эксперимента была сформулирована как оценка современной обитаемости места посадки (Martín-Torres и др., 2020), основой прибора являются датчики, частично пересекающиеся с МТК. Состав датчиков блоков МТК и НАВИТ детализирован в табл. 3.

Таблица 3. Датчики и подсистемы приборов МТК и НАВИТ

Подсистема	Принцип действия	Назначение	Изготовитель	Ссылка
МТК-Л	Три блока	Измерения на спуске и на поверхности	ИКИ РАН	
БД	Трехосный акселерометр	Измерение замедления и угловой скорости ДМ. Восстановление плотности атмосферы до сброса аэродинамического экрана	ИКИ РАН	Липатов и др. (2023а)
БД	Мембранный датчик давления	Измерение давления (10^{-4} –12 мбар) во время спуска и на поверхности	ИКИ РАН	Липатов и др. (2023б)
	Датчик температуры, термосопротивление	Измерение температуры ($\pm 0.1^\circ\text{C}$, отн. точность 0.01°C) во время спуска и на поверхности	ИКИ РАН	Липатов и др. (2023б)
БДА	Лидар	Измерение профиля аэрозоля с поверхности (0–5 км)	ИКИ РАН	Липатов и др. (2023в)

Таблица 3. Окончание

Подсистема	Принцип действия	Назначение	Изготовитель	Ссылка
БДВА		Блок управления и сбора информации МТК-Л	ИКИ РАН	
Метеоштанга МТК		Развертывание метеодатчиков на высоте до 1 м над ПП. Измерения на поверхности	ИКИ РАН	—
Три датчика температуры	Термосопротивления и термопары на трех уровнях (125, 150, 175 см от поверхности)	Мониторинг температуры атмосферы ($\pm 0.2^\circ\text{C}$, отн. точность 0.01°C)	ИКИ РАН	Липатов и др. (2023б)
Датчик ветра	Ионизационный анемометр на метеоштанге	Измерение скорости и направления ветра	ИКИ РАН	Евланов и др. (2015)
Датчик освещенности SIS'2022	Измерение интенсивности солнечного излучения в диапазоне 0.2–1 мкм (на метеоштанге)	Оценка УФ-излучения, содержания озона, оптической плотности атмосферы	INTA (Испания)	Jimenez-Martín и др. (2023)
Датчик влажности МЕТЕО-Н	Датчик Humicap® (на метеоштанге)	Измерение влажности	FMI (Финляндия)	—
Датчик давления МЕТЕО-Р	Датчик Barosap® (в блоке БУ МТК)	Мониторинг давления	FMI (Финляндия)	—
Датчик пыли ODS	Измерение освещенности в течение дня на двух длинах волн (маскированные фотодиоды)	Измерение оптической плотности атмосферы	ИКИ РАН	Хоркин и др. (2023)
Датчик пыли DS'20	Нефелометр ИК-диапазона (2.3 мкм)	Оценка концентрации крупных частиц пыли у поверхности	INTA (Испания)	—
Микрофон*		Запись звуков Марса	ИКИ РАН	—
Магнитометр AMR*	Магниторезистивный датчик на расстоянии 2 м от ПП	Измерения магнитного поля, в том числе на этапе спуска	INTA (Испания)	Díaz Michelena и др. (2023)
БУ МТК		Блок управления и сбора информации	ИКИ РАН	
HABIT EnvPack		Измерения параметров окружающей среды	Omnysys (Швеция)	Martín-Torres и др. (2020)
Датчики температуры ATS	Датчики Pt 1000, по 3 на штангу (3.6 см), 3 штанги на каждом из 3 блоков	Измерение температуры атмосферы ($\pm 0.2^\circ\text{C}$), оценка скорости и направления ветра (± 0.3 м/с)	Omnysys (Швеция)	Gómez-Elvira и др. (2012)
Датчик температуры поверхности GTS	Дистанционное измерение. Термопара (8–14 мкм)	Измерение яркостной температуры поверхности ($\pm 0.8^\circ\text{C}$)	Omnysys (Швеция)	Gómez-Elvira и др. (2012)
УФ-датчики	Шесть фотодиодов с фильтрами (250–350 нм)	Оценка УФ-излучения, содержания озона, оптической плотности атмосферы в УФ-диапазоне	Omnysys (Швеция)	
HABIT BOTTLE	Четыре контейнера с солями CaCl_2 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$, NaClO_4 и контроль — минеральная пыль	Регистрация перехода солей в жидкое состояние	Omnysys (Швеция)	Martín-Torres и др. (2020)

Примечание: * — дополнительные блоки МТК, не связанные с метеорологией.

Во время спуска посадочного модуля вначале работают акселерометры, измеряя замедление спускаемой капсулы (Липатов и др., 2023а). Замедление напрямую связано с плотностью атмосферы, из которой затем могут быть вычислены давление и температура в гидростатическом приближении. В нижней атмосфере, начиная с высоты ~5 км и ниже (после отделения аэродинамического экрана от посадочного аппарата), должны были работать датчики температуры и давления.

Основой МТК послужили разработки для малых станций и пенетраторов проекта Марс-96 (Harri и др., 1998). Основные датчики метеопакета, температуры, давления, влажности изготовлены ИКИ РАН и Финским метеорологическим институтом (FMI). Датчики температуры расположены на метеостанге попарно (один терморезистор и термопара) на высотах 125, 150, 175 см от поверхности Марса. Для уменьшения теплового следа штанги датчики установлены на 5-сантиметровых кронштейнах под разными углами. Датчик, измеряющий температуру на спуске, после посадки располагался на высоте 85 см от поверхности (Липатов и др., 2023б).

Важнейший датчик давления дублирован, использованы мембранный датчик собственного изготовления ИКИ РАН и изделие Barosap® фирмы Vaisala. Сенсорная головка Barosap® представляет собой микроэлектромеханическое устройство (MEMS) из монокристаллического кремния и обладает высокой стабильностью. Оба типа датчиков используют изменение емкости между электродами под действием давления. Датчики были размещены в блоках управления (БД и БУ МТК) в разных частях ПП. Влияние температуры контролируется специальными термодатчиками; поправки вносятся при обработке данных.

В качестве датчика скорости и направления ветра использован ионизационный анемометр разработки и изготовления ИКИ РАН (Evlanov и др., 2001; Евланов и др., 2015). В разреженной атмосфере этот тип анемометра должен обеспечить существенно большую чувствительность по сравнению с обычно применяемыми датчиками на принципе измерения сопротивления нагреваемой фольги или проволоки (см., например, Gómez-Elvira и др., 2012). Для малых станций был разработан датчик оптической плотности Optical Dust Sensor (ODS). Как подтверждено многочисленными натурными наблюдениями, ход освещенности в течение дня, измеренный фотометрами с известным полем зрения на двух длинах волн (красный и синий каналы), позволяет с высокой точностью оценить среднюю за день оптическую толщину атмосферы и обнаруживать облака (Toledo и др., 2016). Изначально разработанный и валидированный во Франции,

для МТК этот датчик был изготовлен ИКИ РАН (Хоркин и др., 2023).

Часть датчиков малых станций Марс-96 планировалась также для установки на малые посадочные модули MetNet, разработанные НПО им. Лавочкина и ИКИ РАН по заказу FMI (Harri и др., 2017). В этом проекте принимали участие также испанские коллеги (Univ. Complutense; INTA, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) с датчиком SIS, таким образом определяя круг основных участников эксперимента МТК. Датчик SIS входил в состав аппаратуры DREAMS (Esposito и др., 2018) посадочного модуля Скиапарелли ЭкзоМарс-2016 (Argüero и др., 2017; Toledo и др., 2017). В состав МТК ПП вошли еще два испанских модуля, инфракрасный нефелометр DS'20 (Dust Sensor) для определения локальной концентрации частиц пыли, разработанный в Univ. Carlos III и изготовленный INTA, и магнитометр AMR (см. далее).

Прототипом лидара послужило устройство, разработанное в ИКИ РАН для неудавшегося проекта NASA Mars Polar Lander (Arumov и др., 1998). Направленный вверх, лидар должен был восстановить профиль аэрозоля в атмосфере Марса до высоты ~5 км (Липатов и др., 2023в), дополняя измерения аэрозоля пассивными оптическими датчиками ODS и SIS. Наконец, в состав МТК вошел микрофон для регистрации звуков Марса и активности ПП и ровера, разработанный ЦНИИМаш и изготовленный ИКИ РАН.

Блок SIS, датчики ветра, температуры и влажности были размещены на методологической штанге — металлической конструкции высотой 1 м, приводимой в вертикальное положение после схода ровера с ПП (рис. 3). Наверху штанги (на высоте ~2.2 м над поверхностью) располагался SIS, под ним датчики ветра и влажности. Датчики температуры располагались на трех уровнях (27, 51 и 75 см от основания штанги) на небольших кронштейнах. У основания метеостанги был размещен блок DS'20. Блок ODS был установлен на противоположной стороне палубы ПП.

Основной модуль HABIT EnvPack содержит набор датчиков температуры (три миништанги длиной 3.6 см на каждом из трех блоков HABIT; три датчика на штангу), датчик яркостной температуры поверхности и шесть фотодиодов, измеряющих УФ-излучение. Максимумы пропускания УФ-фильтров соответствовали 265, 280, 295, 315 и 330 нм, перекрывая диапазоны UV-A, UV-B и UV-C, для которых стандартизована стерилизующая способность УФ-излучения. Датчики EnvPack основаны на разработках для роверов Curiosity и Perseverance (Gómez-Elvira и др., 2012) и его наблюдения за окружающей средой были бы напрямую сопоставимы с их данными.

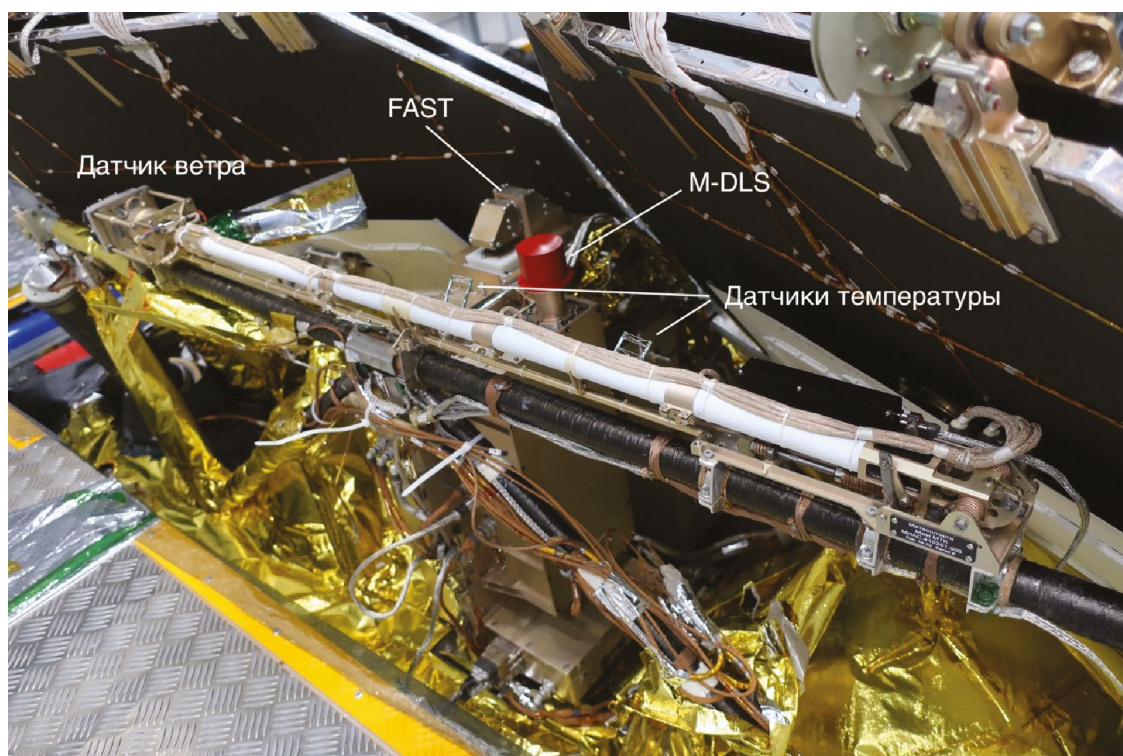


Рис. 3. Штанга МТК в сложенном виде в составе платформы. Основание штанги и механизм раскрытия находятся справа, верх штанги — слева. Показаны датчики температуры (видны два из трех) и ветра. На фотографии также видны закрытый защитной крышкой воздухозаборник М-ДЛС и сканер ФАСТ в парковочном положении (направлен на калибровочное черное тело). Фото ИКИ РАН.

Так, для оценки скорости и направления ветра предполагалось использовать методику обработки данных температурных датчиков атмосферы, разработанную Soria-Salinas и др. (2020) для данных Curiosity.

Блок BOTTLE предназначался для регистрации перехода солей в жидкое состояние в естественных условиях на поверхности Марса (температура, давление, влажность) и, при повышенной температуре, для оценки, могут ли жидкие рассолы существовать на поверхности Марса. Использовались четыре известные на Марсе соли (хлорид кальция, сульфат железа, перхлорат магния и перхлорат натрия) в смеси с абсорбентом и контрольная ячейка с аналогом марсианской пыли. Регистрация растворения проводилась путем измерения проводимости. Нагреватели позволяли использовать ячейки многократно. Также BOTTLE позиционировался как эксперимент по получению жидкой воды, проверка возможности использования местных ресурсов пилотируемыми экспедициями.

Пылевой комплекс ПК

Пылевой комплекс предназначен для контактного изучения свойств пылевых частиц и связанных с переносом пыли атмосферных электриче-

ских явлений (Захаров и др., 2022). ПК разработан и изготовлен ИКИ РАН при участии лаборатории LATMOS, CNRS (Франция). Прототипом основных датчиков прибора был комплекс для исследования лунной пыли ПмЛ (Захаров и др., 2021). Итальянские партнеры (INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte, Неаполь) поставили нефелометрический блок MicroMED, упрощенный вариант одной из подсистем ранее разработанной аппаратуры MEDUSA (Esposito и др., 2011). Пылевой комплекс состоял из основного блока IS-1, двух датчиков и штанги ПК. Датчики ПК расположены выше и ниже палубы ПП и на штанге ПК, ближе от поверхности. Список датчиков ПК приведен в табл. 4.

На блоке IS-1 располагаются пьезоэлектрические (PS) и зарядочувствительные (QS) датчики, а также оптический датчик запыленности (OS). Пьезоэлектрические датчики блока IS-1 расположены на пяти плоскостях усеченной пирамиды. На каждой плоскости содержатся три датчика разных диаметров 4, 15 и 30 мм. Импульс пылевой частицы преобразуется в электрический сигнал. Чувствительность датчиков составляет ~ 10 Н с, что эквивалентно, например, импульсу 4-микронной частицы, летящей со скоростью $\sim 2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Датчики QS представляют собой сетки, расположенные над каждой из пяти плоскостей

Таблица 4. Датчики и подсистемы Пылевого комплекса ПК

Подсистема	Принцип действия	Назначение	Основные параметры
БУС (IS-1)		Блок ударных сенсоров	Включает PS, QS, OS
Ударные датчики (PS)	Пьезоэлектрические датчики (15 шт.)	Измерение импульса пылевых частиц	Чувствительность 10 Н с
Пролетные датчики (QS)	Зарядочувствительные пролетные датчики (пять сеток)	Измерение заряда и скорости (для заряженных частиц)	Чувствительность 1000 Кл
Датчик запыленности (OS)	Оптический датчик, измеряющий накопление пыли	Оценка запыленности поверхности ПП	Измерения на трех длинах волн 525, 670, 885 нм
ECS	Измерение утечки в открытом конденсаторе	Электропроводность атмосферы	$10^{11} - 10^{13}$ Ом
MicroMED	Лазерный нефелометр с прокачкой	Концентрация, распределение частиц по размерам	Частицы 0.4–20 мкм
Штанга ПК	Раскрывающаяся выносная штанга	Размещение IS-2 ближе к поверхности и ECS на удалении от ПП	Датчики IS-2 на высоте 10 см от поверхности; EF-1, –2 на высоте 35 и 70 см от поверхности
IS-2	Восемь пьезодатчиков за общей пролетной сеткой	Измерение импульса частиц и заряда и скорости заряженных частиц	То же, что PS, QS
EF-1, –2	Два электрода, разнесенные по высоте	Измерение электрического поля	± 1 кВ, чувствительность 60 мВ 0–370 Гц
ЕМА	Антенна	Измерение шумов при столкновениях заряженных пылинок	0.12–1.5 МГц

IS-1 с пьезопластинами. При пролете заряженной частицы на них возникает зеркальный наведенный заряд, который можно измерить. Кроме того, по задержке между сигналами QS и пьезодатчиков IS-1 определяется скорость и, при известном импульсе, масса частицы. Аналогично устроен блок IS-2, в котором по два 15- и 30-миллиметровых датчика направлены в четыре стороны и размещены вблизи поверхности. Наверху блока IS-1 установлено прозрачное 20-миллиметровое стекло, под которым находятся три светодиода разных цветов и фотоприемники датчика OS. Степень запыленности стекла определяется по уменьшению интенсивности отраженного света. Датчик электропроводности воздуха ECS представляет собой цилиндрический конденсатор, расположенный с нижней стороны палубы ПП, недалеко от блока IS-1. Сопротивление измеряется по времени разряда.

Штанга ПК расположена рядом с трапами для съезда ровера и позволяет разместить блок датчиков IS-2 ближе к поверхности, а датчики EF-1, –2 подальше от ПП, на высоте 35 и 70 см от поверхности. Анализатор электромагнитной активности (ЕМА) регистрирует электромагнитные разряды, сопровождающие движение и столкновения за-

ряженных пылевых частиц. Антенна ЕМА длиной 0.9 м расположена в штанге ПК. Датчик записывает амплитуду шумового сигнала в диапазоне частот от 0.12 до 1.5 МГц.

Итальянский блок MicroMED представляет собой лазерный нефелометр – счетчик частиц в закрытом объеме с прокачкой. Исследуемый объем (~ 0.3 мм³) освещается коллимированным лучом лазера (0.8 мкм) и рассеянный частицами свет регистрируется детектором, расположенным под углом 90°. Интенсивность и число сигналов за время измерения 520 с позволяют определить концентрацию ($\sim 1 - 100$ см⁻³) и распределение частиц по размерам (0.4–20 мкм).

Фурье-спектрометр ФАСТ

Прибор ФАСТ (FAST, Fourier for Atmosphere and Surface Temperature) предназначен для исследования атмосферы и мониторинга климата Марса методом спектрального анализа солнечного излучения, прошедшего через атмосферу планеты, и собственного излучения атмосферы. Также, наблюдая тепловое излучение поверхности можно измерить ее температуру и оценить минералогический состав пород в доступной для наблюдения

окрестности ПП. Прибор разработан и изготовлен в ИКИ РАН, частично на основе схемных решений Фурье-спектрометра TIRVIM, одного из каналов спектроскопического комплекса ACS на орбитальном аппарате ЭкзоМарс-2016 (Korablev и др., 2018; Shakun и др., 2018). К сожалению, обобщающей публикации по прибору ФАСТ пока нет, часть информации может быть найдена в (Shakun и др., 2017; 2019a; 2019b).

ФАСТ представляет собой моноблок, установленный сверху на краю палубы ПП так, чтобы его оптический вход, снабженный двухкоординатным сканером (рис. 3), мог быть ориентирован в любую точку неба или на поверхность. Спектральный диапазон измерений 1.7–17 мкм, регистрируемый пироэлектрическим детектором без охлаждения. Коротковолновая часть диапазона (1.7–10 мкм) использовалась в режиме наблюдения прямого солнечного излучения прежде всего для детектирования малых составляющих атмосферы, например, метана. Интерферометр был собран по схеме с линейным перемещением одного из зеркал с помощью шарико-винтовой пары. Для обнаружения малых составляющих атмосферы было выбрано максимальное спектральное разрешение 0.05 см^{-1} (без аподизации), для чего требовалась оптическая разность хода интерферометра 12.6 см (при снятии односторонней интерферограммы); время одного измерения составляло 20 мин. Для проведения таких измерений требовалось обеспечить одновременную работу двух прецизионных оптико-механических систем. Одна поддерживала слежение за солнечным диском в течение длительного наблюдения (Shakun и др., 2019a), вторая — плавное движение каретки с зеркалом интерферометра (Shakun и др., 2019b). В лабораторных наблюдениях Солнца при максимальном спектральном разрешении было получено относительно невысокое отношение сигнал/шум ~ 30 , впрочем, достаточное для измерения известных малых составляющих атмосферы (H_2O , CO , O_3) или крупных выбросов метана. Для детектирования метана при содержании 1 ppbv требуется отношение сигнал/шум ≥ 500 . Причиной повышенного шума явились, судя по всему, искажения интерферограммы, связанные с механическими возмущениями при работе системы слежения за Солнцем.

Для наблюдений собственного излучения атмосферы спектральное разрешение составляло 2 см^{-1} , наблюдения были короче и система слежения не использовалась. В этом режиме шум прибора был немногим выше, чем у Mini-TES/Mars Exploration Rovers при спектральном разрешении 10 см^{-1} . Из атмосферных спектров ФАСТ можно восстановить температурный профиль приповерхностных слоев атмосферы, разрешая высо-

ты от десятков метров до 0.5 км, а также измерить оптическую плотность пылевого и ледяного аэрозоля.

Газоаналитический комплекс МГАК

Марсианский газоаналитический комплекс МГАК (MGAP) предназначен для исследования состава атмосферных проб методом газовой хроматографии и последующей масс-спектрометрии. Прибор разработан и изготовлен в ИКИ РАН на основе элементов комплекса для анализа грунта методом пиролиза КНА на КА Фобос-Грунт. Параллельно с ЭкзоМарс шла разработка аналогичного комплекса для проекта Луна-27. К сожалению, публикации, описывающие какую-либо версию прибора, практически отсутствуют. В докладе (Gerasimov и др., 2014) приведена концепция МГАК на этапе предложения, когда планировался анализ и грунта, и атмосферных проб. Узлы, предназначенные для подготовки образцов грунта и пиролиза, были исключены. Также швейцарские партнеры не смогли поставить планировавшийся вначале, как для Луны-27, время-пролетный масс-спектрометр (Hofer и др., 2015). МГАК версии 2022 состоит из двух блоков: газового хроматографа (ГХМ) с двумя хроматографическими колонками и масс-спектрометра на принципе ионной ловушки. Лазерный спектрометр М-ДЛС (см. ниже) был выделен в самостоятельный прибор, но М-ДЛС и МГАК имеют общую систему подготовки атмосферной пробы.

Воздух поступает в МГАК через систему пробоподготовки М-ДЛС, включающую фильтры грубой и тонкой очистки и ряд клапанов. Всасывающий насос находится в блоке МГАК, с которым М-ДЛС соединен капилляром, т. е. МГАК забирает атмосферную пробу через М-ДЛС. ГХМ разделяет смесь газов на молекулярные компоненты, выход которых регистрируется детекторами теплопроводности. МГАК — сложная система, включающая, помимо основных измерительных систем, множество вспомогательных — насосы, резервуар для газа-носителя (He_2), капилляры с подогревом, микроклапанные блоки и др. Использовались две капиллярные колонки с молекулярными ситами 5A и PoraPlot Q, разделяющими постоянные и благородные газы. Перед анализом газы могут проходить через ловушки обогащения, повышающие концентрацию малых газовых составляющих за счет их накопления на адсорбентах и последующего выделения для анализа. Для каждой колонки имела своя инжекторная ловушка. После каждого измерения производился прогрев всей системы. Длительность типичного цикла измерения МГАК составляла около 1 ч.

Масс-спектрометр нейтральных газов был изготовлен в ИКИ РАН по образцу аналогичного устройства в составе прибора Ptolemy/Rosetta (Todd и др., 2007). Этот тип масс-спектрометра компактен и допускает работу при невысоком вакууме. Он позволяет работать в диапазоне масса/заряд 12–50 (от воды до ксенона) и измерять отношения изотопов. Масс-спектрометр откачивался специальным насосом до $\leq 10^{-4}$ торр.

Лазерный спектрометр М-ДЛС

Многоканальный спектрометр на диодных лазерах М-ДЛС (M-DLS) предназначен для исследования состава атмосферных проб методом спектроскопии сверхвысокого разрешения. Прибор разработан и изготовлен в ИКИ РАН в тесном сотрудничестве с МФТИ (Rodin и др., 2020). Прототипом прибора является аналогичное устройство, входившее в состав газоаналитического комплекса КНА на КА Фобос-Грунт (Durry и др., 2010).

М-ДЛС — моноблок с головкой для забора атмосферных проб (рис. 3), соединенный капилляром с блоком ГХМ МГАК. Прибор анализирует атмосферную пробу в многопроходной оптической кювете, регистрируя поглощение в отдельных спектральных линиях атмосферных газов в ближнем ИК-диапазоне. Линии детектируются при перестройке длины волны полупроводникового лазерного диода. Диапазон такой перестройки (путем модуляции тока накачки лазера) обычно не более 1 см^{-1} , и, как правило, на каждый газ требуется свой лазер. Спектральное разрешение $\sim 0.002\text{ см}^{-1}$. В приборе реализован принцип спектроскопии с интегрированным резонатором. Основной элемент — ячейка ICOS (Integrated Cavity Optical Spectroscopy) — представляет собой пару сферических зеркал, разнесенных на расстояние (22 см), немного меньше их фокуса. Внеосевой ввод луча в ячейку дает множество поперечных мод, плотно заполняющих резонатор и, в зависимости от коэффициентов отражения зеркал, эффективный оптический путь от лазера до детектора до 110 м. Используются два лазера 2.656 и 2.808 мкм для регистрации линий поглощения CO_2 , H_2O и их изотопологов. В диапазон попадают семь линий основного изотополога CO_2 и по одной $^{16}\text{O}^{12}\text{C}^{18}\text{O}$, $^{16}\text{O}^{12}\text{C}^{17}\text{O}$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$, а также три — основного изотополога H_2O и по одной HD^{16}O , H_2^{18}O .

Перед измерением ячейка откачивалась; при необходимости увеличить чувствительность можно поднять давление от атмосферного (5–10 мбар) до ~ 30 мбар. Одно измерение занимало 6 мин.; с накоплением длительность измерения доходила до 90 мин. В лабораторных испытаниях была

продемонстрирована точность измерения отношений изотопов, приближающаяся к точности спектроскопических параметров линий в базе HITRAN.

Радиометр РАТ-М

Микроволновый радиометр РАТ-М (РАдио-Термометр для Марса или PIAnk Thermometer for Mars) предназначен для измерения яркостной температуры поверхности в трех диапазонах (6, 8 и 15 ГГц). Прибор разработан и изготовлен в ИКИ РАН под руководством Д.П. Скулачева; публикации по прибору отсутствуют.

РАТ-М представляет собой моноблок с двумя рупорными антеннами, одна из которых направлена на поверхность, а другая — в зенит. Диаграмма направленности антенн широкая — $\sim 45^\circ$. Излучение от поверхности в полосе ~ 1 ГГц сравнивается с сигналом от атмосферы, практически прозрачной в микроволновом диапазоне при малом содержании пыли. Ожидаемая толщина скин-слоя марсианского реголита для длин волн от 1.7 до 3 см составит от 5 до 50 см, что может позволить оценить профиль температуры грунта вплоть до глубины 1 м и зарегистрировать его суточные и сезонные изменения. Чувствительность прибора $\sim 0.25\text{ К}$.

РАТ-М предоставляет также возможность оценки оптической толщины атмосферы в условиях сильной запыленности во время глобальных или региональных пылевых бурь. Сигнал сравнения в данном случае становится основным. Ослабление микроволнового излучения пылевыми частицами в атмосфере определяется рэлеевским рассеянием, и яркостная температура неба во время пылевой бури (5–50 К) является измеримой величиной, даже учитывая неопределенности температуры грунта. Таким образом, РАТ-М смог бы оценить содержание пыли в атмосфере, когда оптическая толщина становится слишком большой, чтобы быть измеренной в видимом (датчики МТК) или ИК-(ФАСТ) диапазонах.

Активный нейтронный и гамма-спектрометр с блоком дозиметрии АДРОН-ЭМ

Комплекс приборов АДРОН-ЭМ (ADRON-EM) предназначен для определения элементного состава приповерхностного слоя грунта (до глубины 1–2 м) методом активного импульсного нейтронного зондирования и измерения вторичного нейтронного и гамма-излучения (Mokrousov и др., 2022). АДРОН-ЭМ объединяет пять функциональных узлов: импульсный нейтронный

генератор (ИНГ), детекторы нейтронов (ДН), детектор гамма-излучения (ГД), модуль дозиметров (ДМ) и модуль электроники (МЭ). Модули ДН, ГД и МЭ объединены в общий блок детекторов и электроники, ИНГ и дозиметр представляют собой отдельные блоки. АДРОН-ЭМ разработан и изготовлен в ИКИ РАН на основе ранее разработанных DAN/Curiosity (Mitrofanov и др., 2012) и MGNS/Beipi Colombo (Mitrofanov и др., 2021) и параллельно с созданием приборов ADRON-RM для ровера Rosalind Franklin (Mitrofanov и др., 2017) и АДРОН-ЛР (Головин и др., 2021). Блок ИНГ (PNG), генератор нейтронных импульсов для облучения вещества поверхности, разработан и изготовлен во ВНИИА им Н.Л. Духова. Такое устройство было впервые использовано в космосе в приборе DAN/Curiosity.

Гидратация поверхности оценивалась путем измерения потока нейтронов, образующихся на глубине 1–2 м в результате взаимодействия высокоэнергетичных заряженных частиц галактических космических лучей (ГКЛ), или активированных генератором нейтронных импульсов нейтронов, ИНГ. Ядра легких элементов, особенно водорода, эффективно тормозят быстрые нейтроны благодаря их близким массам.

Детекторы нейтронов (модуль ДН), два пропорциональных ^3He -счетчика, регистрируют нейтроны с энергиями от 0.05 эВ до 1 кэВ. Один из счетчиков окружен кадмиевым экраном, непрозрачным для тепловых нейтронов (≤ 0.4 эВ). Таким образом, разница в скорости счета детекторов соответствует вкладу тепловых нейтронов.

Блок ИНГ генерирует импульсы нейтронов с энергией 14.4 МэВ при столкновении ускоренных ионов дейтерия с тритиевой мишенью. Длительность импульсов составляет ~ 2 мкс, частота повторения – до 10 Гц. Импульсы продолжительностью ~ 2 мкс проникают в грунт Марса на глубину около 1 м. Реакции неупругого рассеяния идут в течение десятков микросекунд после нейтронного импульса, и регистрация задержки вторичного нейтронного излучения позволяет восстановить профиль гидратации грунта до глубины ~ 0.5 м с шагом 0.1 м.

Гамма-спектрометр (блок ГД) регистрирует гамма-кванты в диапазоне от 200 кэВ до 7 МэВ. Использован сцинтилляционный детектор на основе CeBr_3 , имеющий спектральное разрешение лучше 4.5% на 662 кэВ. Нейтроны взаимодействуют с ядрами вещества в реакции неупругого рассеяния и захвата, сопровождающихся испусканием гамма-квантов. Кроме этого, при облучении образуются короткоживущие изотопы, распад которых также сопровождается гамма-излучением. Измерение гамма-спектра

позволяет получить информацию о содержании основных породообразующих (O, Si, Al, Fe, Mg, Na, Ca) и радиогенных элементов (K, U, Th) в составе минералов в ближайшей (≤ 3 м) окрестности места посадки. Параллельно измеряется плотность грунта.

Модуль АДРОН-ДМ (Lulin-ML) предназначен для мониторинга радиационной обстановки (определение радиационной дозы по заряженным частицам). Узел разработан и создан в Институте космических исследований и технологий Болгарской академии наук, София, на основе семейства приборов Lulin (см., например, Semkova и др., 1994; Mitrofanov и др., 2018). В приборе два перпендикулярно расположенных дозиметрических телескопа, каждый из которых состоит из двух кремниевых PIN-фотодиодов толщиной 0.3 мм и площадью 2 см², разнесенных на расстояние 21 мм. Прибор измерял мощность поглощенной дозы в диапазоне 10^{-6} –1 грей/ч и спектр передачи энергии от 60 кэВ до 180 МэВ. Время накопления спектров составляло 1 ч.

Магнитометры MAIGRET и AMR

Аппаратура МЕГРЭ (MAIGRET, Martian ground electromagnetic tool) состоит из трех блоков: штанги LEMI SEM, датчика UF-M и блока электроники. Функционально он включает индукционный (search coil) и феррозондовый (fluxgate) магнитометры, антенну электрического поля и анализатор спектра. Прибор создан в ИКИ РАН под руководством А.В. Скальского с ключевым вкладом Института атмосферной физики (Чехия), поставившим индукционный магнитометр и блок анализа волн WAM (Wave Analyzer Module) – часть блока электроники MAIGRET (Kolmasova и др., 2017). Других публикаций по прибору, к сожалению, нет. Предшественником MAIGRET был комплекс для плазменно-волновых измерений ФПМС на космическом аппарате Фобос-Грунт. На рис. 4 показан блок LEMI SEM в составе ПП.

MAIGRET измеряет квазипостоянное (± 30000 нТ, частоты до 32 Гц) магнитное и переменное (0.1–40 кГц) электромагнитное поля. Он предназначен для регистрации намагниченности коры и ее вариаций, электромагнитного излучения, приходящего из космоса, и атмосферных электрических разрядов, возникающих во время пылевых явлений.

Магнитометр Anisotropic MagnetoResistance, AMR (Díaz Michelena и др., 2023), представляет собой двухвекторный магниторезистивный датчик с устройством разворачивания, выбрасывающим его на расстояние 2 м от ПП. При-



Рис. 4. Блок LEMI SEM. Фото ИКИ РАН.

бор разработан и создан на предприятии INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) в Испании. Диапазон измерений составляет ± 150 мкТл с разрешением 1 нТл и шумом ~ 0.5 нТл Гц $^{-1/2}$. Прибор вошел в состав аппаратуры МТК и управлялся блоком МТК-Л, который предусматривал включение AMR и во время спуска (с высоты ~ 125 км) и на поверхности. Это позволило бы проверить точность моделей, экстраполирующих измерения магнитного поля Марса с орбиты к поверхности. Также, за счет удаления от не обеспечивающей магнитной чистоты платформы, AMR позволил бы уточнить измерения квазипостоянного магнитного поля MAIGRET.

Сейсмометр SEM (СЭМ)

SEM (Seismometer for ExoMars) предназначен для измерения микровибраций поверхности Марса, его квазистатических движений и вариаций гравитационного поля (Манукин и др., 2021). Это новая разработка ИКИ РАН при участии Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Дальним прототипом прибора можно считать микрогравиметр ГРАС-Ф проекта Фобос-Грунт (Манукин и др., 2010). Прибор представляет собой моноблок, основной объем которого определяет система развертывания. Она должна обеспечить контакт датчиков с поверхностью и их изоляцию от вибраций ПП и ветра.

Датчиковая часть состоит из трех одинаковых одноосных акселерометров, установленных под углом 90° , симметрично относительно гравитационной вертикали. В каждом канале цилиндрическая пробная масса (50 г) была подвешена на шести упругих элементах из бериллиевой бронзы, так что она могла двигаться лишь вдоль одной координаты. Линейное перемещение регистрировалось по изменению емкости. SEM измеряет медленные наклоны в диапазоне $\pm 3 \times 10^{-3}$ град с чувствительностью 3×10^{-9} для периодов от 100 с до месяцев и вариации гравитационного ускорения до 1.7×10^{-2} м с $^{-2}$ с чувствительностью $\sim 10^{-9}$ м с $^{-2}$. Колебания поверхности по трем осям измеряются в диапазоне частот 0.1–10 Гц с чувствительностью по амплитуде $\sim 4 \times 10^{-11}$ м на 1 Гц.

Система развертывания должна была установить SEM под корпусом ПП. Защитный кожух с прибором опускался на поверхность при помощи пантографа (рис. 5), и затем прибор свободно выпадал с высоты 5–10 мм. Для установки по вертикали система ориентации подвешивала блок датчиков на карданном подвесе вдоль местной гравитационной вертикали с помощью электромагнита; затем, после снятия напряжения с электромагнита, опускала на опору. При необходимости эту операцию можно было повторять многократно. Для обеспечения работы прибора в режиме постоянного мониторинга он был испытан в диапазоне температур от -130 до $+60^\circ\text{C}$.

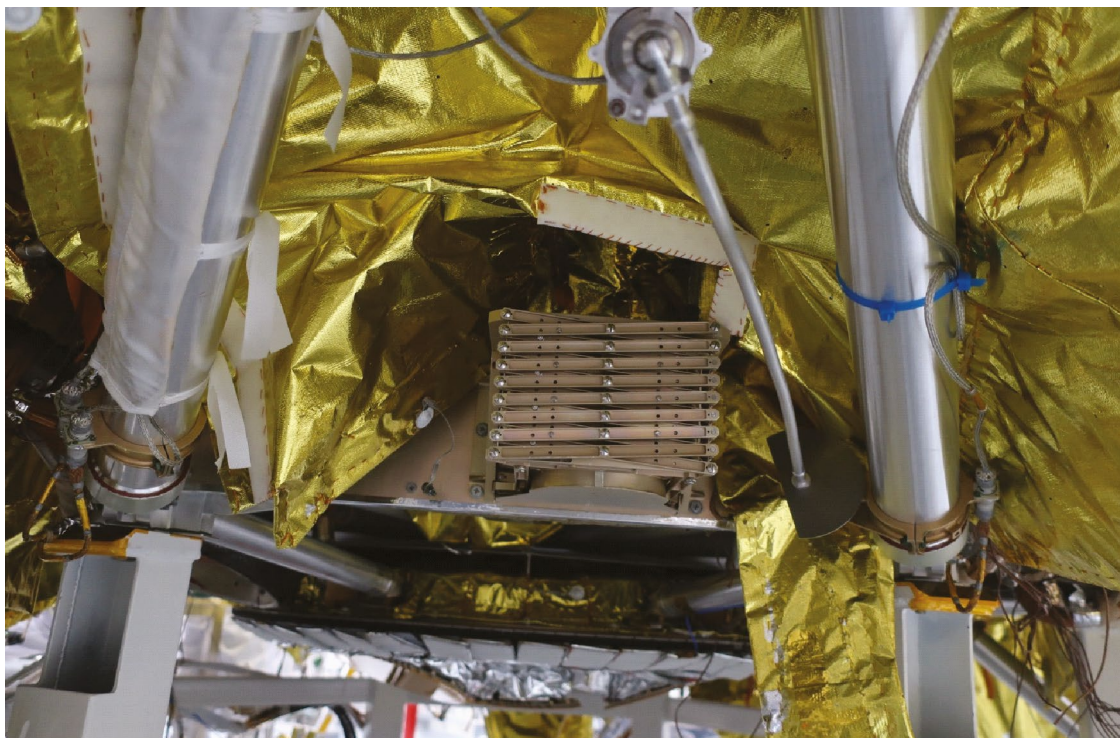


Рис. 5. Нижняя часть ПП. Виден пантограф системы развертывания СЭМ. Фото ИКИ РАН.

Когерентный транспондер LaRa

Прибор LaRa (Lander Radioscience) предназначен для высокоточного определения параметров движения и вращения Марса. Используется доплеровский сдвиг при передаче радиосигнала между ПП на поверхности Марса и наземными станциями (Dehant и др., 2020). Прибор разработан в Бельгии под руководством Королевской обсерватории в Брюсселе (Royal Observatory of Belgium) и изготовлен бельгийской компанией OHV Antwerp Space. Прибор состоит из транспондера и трех дисковых антенн, две передающие и одна приемная. Эксперимент по измерению взаимного положения Марса и Земли включает наземный сегмент, в качестве которого планировалось использовать DSN NASA и ESTRACK ESA. Также рассматривалось применение российской станции в Калязине.

LaRa представляет собой приемопередатчик X-диапазона, сохраняющий фазу принятого сигнала. С Земли направлялся высокостабильный сигнал частоты 7.2 ГГц, и обратно передавалась частота 8.4 ГГц. Выходная мощность передатчика 5 Вт при потреблении 42 Вт.

Блок интерфейсов и памяти, БИП

БИП предназначен для управления приборами КНА, а также для приема, хранения и передачи научной информации приборов. С одной

стороны к БИП подключены приборы, с другой — бортовой вычислитель ПП ОВС (On-Board Computer). БИП соединен с ОВС по интерфейсу MIL 1553. БИП отвечает за выдачу цифровых команд приборам в соответствии с циклограммой, сбор данных со всех приборов, отработку нештатных ситуаций при работе КНА, хранение данных в энергонезависимой памяти и передачу данных в радиоканал ПП (через ОВС). Электропитание на приборы подавалось непосредственно от ПП. БИП создан в ИКИ РАН на основе многочисленных разработок для других проектов. Краткое описание и схему аналогичного блока электроники прибора ACS/ЭкзоМарс-2016 можно найти в (Korablev и др., 2018).

ПЛАН ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным фактором, ограничивающим работу КНА на поверхности, был доступный для передачи на Землю объем данных. Он должен был идти через орбитальные аппараты вокруг Марса (номинально — КА TGO). Тот же канал связи используется ровером. Для ПП был согласован средний доступный объем 150 Мбит в сол (марсианский день) при условии равного деления канала между ПП и ровером. В реальности при делении этого объема предусматривалась определенная гибкость для получения максимальной

научной отдачи от проекта. Кроме того, БИП мог сохранять значительный объем информации, позволяя накопить данные и передать их на Землю, когда появится возможность.

Энергопотребление всех приборов КНА на этапе спуска и посадки (EDL) не должно превышать 30 Вт. Во время работы на поверхности энергопотребление не должно превышать 120 Вт днем и 25 Вт ночью. Длительность дня принимается в 10 локальных часов.

Основные этапы проекта делятся на фазу перелета к Марсу (Cruise), спуска в атмосфере и посадки (EDL — entry, descent, landing), после посадки и до съезда ровера и фазу рутинных операций на поверхности.

На этапе перелета к Марсу планировалось проведение проверочных включений приборов, за исключением антенн прибора LaRa, и работа прибора АДРОН-ЭМ, включая дозиметрический модуль в пассивном режиме в течение максимально возможного времени.

Фаза EDL (спуск в атмосфере и посадка)

Десантный модуль входит в атмосферу со скоростью ~5.5 км/с. С высоты ~120 км начинается его торможение за счет сопротивления атмосферы в течение ~3 мин. На высоте 8–10 км раскрывается первый сверхзвуковой парашют диаметром 16 м (скорость 2 М, 470 м/с). Через 20 с на высоте 4–6 км раскрывается второй дозвуковой парашют диаметром 35 м (скорость 0.6 М, ~150 м/с). Через 10 с на высоте 3–5 км (скорость 64 м/с) сбрасывается тормозной экран, выдвигаются ноги ПП, компенсируется закрутка. С высоты 2 км радиовысотомер начинает отслеживать высоту и вектор скорости. По этим данным на высоте ~1 км над поверхностью (скорость 36 м/с) задний кожух и парашют отделяются и ПП уходит в свободное падение примерно на 1 с. Это делается для увеличения вертикального разделения по отношению к задней обшивке и парашюту. Затем посадочный модуль выполняет боковой маневр ухода от столкновения (10 с) и переходит к интенсивному торможению в течение 7 с — последние 500 м — до касания на скорости ≤ 2 м/с.

В течение EDL должны были работать часть метеоконкомплекса (МТК-Л, в том числе магнитометр AMR) и камеры ТСПП-ЭМ. Оба прибора имели собственную управляющую электронику с энергонезависимой памятью, что обеспечивало их автономную работу без участия БИП. Включение БИП не предусматривалось, чтобы полностью исключить его влияние на ОВС во время управления критически-важными процессами при спуске.

МТК-Л включается через 3 мин. после разделения десантного и перелетного модулей и авто-

номно работает до посадки. Потребляемая мощность ~2 Вт. До отделения аэродинамического щита опрашиваются акселерометр и AMR (до посадки), затем датчики давления и температуры (до посадки). После отделения парашютной системы включается лидар (до посадки).

ТСПП-ЭМ приводится в готовность за 200 с до посадки и с этого момента всеми четырьмя камерами снимает видео форматом 512 × 512, 10 кадров в секунду. Видео объемом 11 Гбит может быть уменьшено выбором частоты кадров и передано на Землю, когда будет возможность для передачи значительного объема данных без ущерба для других научных приборов. После посадки включается БИП и по его команде снимается панорама максимальной четкости. Полная панорама занимает 90 Мбит.

После посадки и до съезда ровера также с помощью камер ТСПП-ЭМ и по командам БИП осуществляется поддержка съезда марсохода. Приоритет на это время отдавался операциям, связанным с ровером. Чтобы продлить ряд метеонаблюдений, было предусмотрено включение МТК-Л (датчики давления и температуры) в автономном режиме.

Фаза операций на поверхности

После съезда ровера посадочная платформа начинает свою номинальную научную деятельность. Проводятся необходимые подготовительные процедуры: раскрытие штанг МТК и ПК, установка прибора СЭМ на поверхность, раскрытие системы забора проб М-ДЛС, установка магнитометра AMR на поверхность, калибровка приборов КНА.

Приборы КНА могут быть разделены на две группы: требующие постоянной работы в режиме мониторинга (МТК, МЭГРЭ, РАТ-М, НАВИТ, ПК, СЭМ, АДРОН-ЭМ в пассивном режиме с дозиметром) и не требующие постоянной работы (ФАСТ, МГАК, М-ДЛС, ТСПП-ЭМ, LaRa, АДРОН-ЭМ в активном режиме). Ночью работа мониторинговых приборов ограничена общим энергопотреблением ≤ 25 Вт. Приоритет давался приборам, которые могут работать без БИП, накапливая данные для передачи в БИП днем. Такая возможность была у всех мониторинговых приборов, кроме АДРОН-ЭМ.

Для планирования был разработан ряд стандартных последовательностей на один сол. Они могут быть поделены на три основные категории: мониторинговые солы (основное различие в ночной работе), мониторинговые солы и дневная работа других приборов, и сценарии, экономящие энергию, например, в случае нештатных ситуаций или когда требуется подзарядка аккумуляторных

	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
BIP									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
PK	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
MTK	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
MAIGRET									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
SEM	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
RAT-M										+		+		+		+		+						
Habit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ADRON-EM Pass/Dos									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						

	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
BIP									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
PK	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
MTK	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
MAIGRET									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
SEM	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
RAT-M			+			+				+		+		+		+		+				+		
Habit									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
ADRON-EM Pass/Dos									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
MGAK												+	+											
M-DLS														+										

Рис. 6. Примеры сценариев работы КНА на поверхности: (а) — мониторинговый сол 1. Ночью работают МТК, НАВИТ, ПК, СЭМ. БИП отключен. Днем работают все мониторинговые приборы. Объем данных ~6.3 Мбайт; максимальное энергопотребление 25 Вт (ночь), 49 Вт (день); (б) — сценарий работы для приборов МГАК и М-ДЛС: любой мониторинговый сол и дневная работа приборов МГАК и М-ДЛС. В качестве примера приведен мониторинговый сол № 3. Объем данных ~13.0 Мбайт; максимальное энергопотребление: 21 Вт (ночь), 84 Вт (день).

батарей ПП. Для получения желаемой циклограммы различные сценарии могли комбинироваться. Кроме того, предусматривалась разработка сценариев по запросам, которые будут выполняться один раз за все время работы на поверхности. Примеры сценариев приведены на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проекте ЭкзоМарс дистанционные исследования Марса с орбитального аппарата вокруг Марса — Trace Gas Orbiter (ЭкзоМарс-2016) — должен был дополнить комплекс научной аппаратуры посадочной платформы и ровера ЭкзоМарс-2022 на поверхности. Планировался широкий круг исследований, включая мониторинг климата, состав атмосферы, механизмов подъема пыли, взаимодействий между атмосферой и поверхностью, распространенности воды под поверхностью, мониторинг радиации и изучение внутреннего строения.

Многие задачи имели высокоприоритетный характер, соответствующие исследования планировались впервые или конкурировали бы

с единичными аналогами. К таким можно отнести исследования механизмов подъема пыли и возникновения пылевых бурь, двухточечную сейсмометрию совместно с InSight, измерения профиля магнитного поля при спуске, комплексные исследования взаимодействия атмосфера—поверхность и др. Одновременные измерения с InSight не могли состояться: проект дважды откладывался по объективным причинам (задержка разработки в 2018 г. и пандемия в 2020 г.). Также два прибора, первоначально ставившие своей целью приоритетные измерения биогенных газов (метана) с поверхности, в процессе разработки по разным причинам утратили соответствующий функционал. Возможности остальных экспериментов были в полной мере подтверждены в ходе испытаний и калибровок летных образцов приборов КНА.

После прекращения работ по проекту остался полностью готовый и испытанный космический комплекс. Мы надеемся на продолжение исследований и проведение части запланированных экспериментов, вероятно, в кооперации с новыми партнерами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов Н.Ф., Полянский И.В., Прохорова С.А., Эльшев Я.Д. Результаты наземных испытаний телевизионной системы посадочной платформы КА ЭкзоМарс-2022 // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 5. С. 393–402.
- Авдудевский В.С., Аким Э.Л., Алешин В.И., Бородин Н.Ф., Кержанович В.В., Мальков Я.В., Маров М.Я., Морозов С.Ф., Рождественский М.К., Рябов О.Л., Субботин М.И., Суслов В.М. Черемухина З.П., Шкирина В.И. Атмосфера Марса в районе посадки спускаемого аппарата “Марс-6” (предварительные результаты) // Космич. исслед. 1975. Т. 13. С. 21–32.
- Головин Д.В., Мокроусов М.И., Митрофанов И.Г., Козырев А.С., Литвак М.Л., Малахов А.В., Никифоров С.Ю., Санин А.В., Бармаков Ю.Н., Боголюбов Е.П., Шоленинов С.Э., Юрков Д.И. Прибор АДРОН-ЛР для активного нейтронного зондирования состава лунного вещества // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 542–549. (Golovin D.V., Mokrousov M.I., Mitrofanov I.G., Kozurev A.S., Litvak M.L., Malakhov A.V., Nikiforov S. Yu., Sanin, A.B., Barmakov Y.N., Bogolubov E.P., Sholeninov S.E., Yurkov D.I. ADRON-LR instrument for active neutron sensing of the lunar matter composition // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. P. 529–536). <https://doi.org/10.1134/S0038094621060046>
- Евланов Е.Н., Завьялов М.А., Подколзин С.Н., Родионов Д.С., Торюканов П.М., Липатов А.Н., Экономов А.П. Газоразрядный анемометр // Датчики и системы. 2015. Т. 190. № 3. С. 47–50.
- Захаров А.В., Дольников Г.Г., Кузнецов И.А., Ляш А.Н., Esposito F., Molfese C., Arruego Rodríguez I., Seran E., Godefroy, M. и 38 соавторов. Пылевой комплекс для исследований динамики пылевых частиц в приповерхностной атмосфере Марса // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 6. С. 371–388. (Zakharov A.V., Dolnikov G.G., Kuznetsov I.A., Lyash A.N., Esposito F., Molfese C., Arruego Rodríguez I., Seran E., Godefroy, M., and 38 co-authors. Dust complex for studying the dust particle dynamics in the near-surface atmosphere of Mars // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 6. P. 351–368). <https://doi.org/10.1134/S0038094622060065>
- Захаров А.В., Дольников Г.Г., Кузнецов И.А., Ляш А.Н., Дубов А.Е., Афонин В.В., Бедняков С.А., Бычкова А.С., Грушин В.А., Докучаев И.В. и 10 соавторов. Прибор ПМЛ на посадочном аппарате Луна-25: плазменно-пылевые измерения в приповерхностной экзосфере // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 589–600. (Zakharov A.V., Dol'nikov G.G., Kuznetsov I.A., Lyash A.N., Dubov A.E., Afonin V.V., Bednyakov S.A., Bychkova A.S., Grushin V.A., Dokuchaev I.V., and 10 co-authors. PmL instrument onboard Luna-25 Lander: Plasma–dust measurements in the surface exosphere // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. № 6. P. 576–587). <https://doi.org/10.1134/S0038094621060125>
- Иванов М.А., Слюта Е.Н., Гришакина Е.А., Дмитриевский А.А. Геоморфологический анализ потенциального места посадки КА “ЭкзоМарс” Oxia Planum // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 1. С. 3–17. (Ivanov M.A., Slyuta E.N., Grishakina E.A., Dmitrovskii A.A. Geomorphological analysis of ExoMars candidate landing site Oxia Planum // Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. № 1. P. 1–14). <https://doi.org/10.1134/S0038094620010050>
- Липатов А.Н., Экономов А.П., Макаров В.С., Лесных В.А., Горетов В.А., Захаркин Г.В., Зайцев М.А., Хлюстова Л.И., Антоненко С.А. Акселерометры метеоконтекста для исследования верхней атмосферы Марса // Астрон. вестн. 2023а. Т. 57. № 4. С. 333–341. (Lipatov A.N., Ekonomov A.P., Makarov V.S., Lesnykh V.A., Goretov V.A., Zakharkin G.V., Zaitsev M.A., Khlyustova L.I., Antonenko S.A. Accelerometers of the meteorological complex for the study of the upper atmosphere of Mars // Sol. Syst. Res. 2023a. V. 57. № 4. P. 349–357). <https://doi.org/10.1134/S0038094623040081>
- Липатов А.Н., Экономов А.П., Макаров В.С., Лесных В.А., Горетов В.А., Захаркин Г.В., Зайцев М.А., Хлюстова Л.И., Антоненко С.А. Датчики температуры и давления метеоконтекста для исследования атмосферы Марса // Астрон. вестн. 2023б. Т. 57. № 4. С. 319–332. (Lipatov A.N., Ekonomov A.P., Makarov V.S., Lesnykh V.A., Goretov V.A., Zakharkin G.V., Zaitsev M.A., Khlyustova L.I., Antonenko S.A. Temperature and pressure sensors of the meteorological complex for the study of the Mars's atmosphere // Sol. Syst. Res. 2023b. V. 57. № 4. P. 336–348). <https://doi.org/10.1134/S003809462304007X>
- Липатов А.Н., Ляш А.Н., Экономов А.П., Макаров В.С., Лесных В.А., Горетов В.А., Захаркин Г.В., Зайцев М.А., Хлюстова Л.И., Антоненко С.А., Родионов Д.С., Кораблев О.И. Лидар для исследования атмосферы Марса с поверхности // Астрон. вестн. 2023в. Т. 57. № 4. С. 342–356. (Lipatov A.N., Lyash A.N., Ekonomov A.P., Makarov V.S., Lesnykh V.A., Goretov V.A., Zakharkin G.V., Khlyustova L.I., Antonenko S.A., Rodionov D.S., Korablev O.I. LIDAR for investigation of the Martian atmosphere from the surface // Sol. Syst. Res. 2023c. V. 57. № 4. P. 358–372). <https://doi.org/10.1134/S0038094623040093>
- Манукин А.Б., Казанцева О.С., Калинин И.И., Матюнин В.П., Саякина Н.Ф., Тоньшев А.К., Черногорова Н.А. Сейсмометр для наблюдений на Марсе // Космич. исслед. 2021. Т. 59. № 5. С. 418–427. (Manukin, A.B., Kazantseva, O.S., Kalinnikov, I.I., Matyunin V.P., Sayakina N.F., Ton'shev A.K., Chernogorova N.A. A Seismometer for Observations on Mars // Cosmic Res. 2021. V. 59. P. 366–375). <https://doi.org/10.1134/S0010952521050087>
- Москатиныйев И.В., Иванов А.С., Алексашкин С.Н., Острешко Б.А. Космический аппарат “ЭкзоМарс-2022” // Российский сегмент международной космической экспедиции “ЭкзоМарс-2022” / Ред.: Ефанов В.В., Карчаев Х.Ж. Химки: Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, 2020а. Т. 1. С. 52–56.
- Москатиныйев И.В., Иванов А.С., Алексашкин С.Н., Острешко Б.А. Посадочный Модуль “ЭкзоМарс-2022” // Российский сегмент международной

- космической экспедиции “ЭкзоМарс- 2022” / Ред.: Ефанов В.В., Карчаев Х.Ж. Химки: Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, 2020б. Т. 1. С. 100–111.
- Хоркин В.С., Федорова А.А., Доброленский Ю.С., Кораблев О.И., Вязоветский Н.А., Дзюбан И.А., Сапгир А.Г., Титов А.Ю., Толедо Д., Помро Ж.-П., Ранну П. Прибор ODS миссии ЭкзоМарс-2022: моделирование и наземные полевые измерения // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 4. С. 307–318. (Khorkin V.S., Fedorova A.A., Dobrolenskiy Y.S., Korablev O.I., Vyazovetskiy N.A., Dzuban I.A., Sapgir A.G., Titov A. Yu., Toledo D., Pommereau J.-P., Rannou P. ExoMars-2022 mission ODS instrument: Modeling and ground field measurements // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. P. 324–335). <https://doi.org/10.1134/S0038094623040056>
- Aboudan A., Colombatti G., Bettanini C., Ferri F., Lewis S., Van Hove B., Karatekin O., Debei S. ExoMars 2016 Schiaparelli Module trajectory and atmospheric profiles reconstruction. Analysis of the on-board inertial and radar measurements // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. id. 97. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0532-3>
- Acuna M.H., Connerney J.E.P., Ness N.F., Lin R.P., Mitchell D., Carlson C.W., McFadden J., Anderson K.A., Rème H., Mazelle C., Vignes D., Wasilewski P., Cloutier P. Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment // Science. 1999. V. 284. id. 790. <https://doi.org/10.1126/science.284.5415.790>.
- Alday J., Trokhimovskiy A., Irwin P.G.J., Wilson C.F., Montmessin F., Lefèvre F., Fedorova A.A., Belyaev D.A., Olsen K.S., Korablev O., and 6 co-authors. Isotopic fractionation of water and its photolytic products in the atmosphere of Mars // Nature Astron. 2021a. V. 5. P. 943–950. <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01389-x>
- Alday J., Wilson C.F., Irwin P.G.J., Trokhimovskiy A., Montmessin F., Fedorova A.A., Belyaev D.A., Olsen K.S., Korablev O., Lefèvre F., and 4 co-authors. Isotopic composition of CO₂ in the atmosphere of Mars: Fractionation by diffusive separation observed by the ExoMars Trace Gas Orbiter // J. Geophys. Res.: Planets. 2021b. V. 126. id. e06992. <https://doi.org/10.1029/2021JE006992>
- Anderson D.L., Miller W.F., Duennebie F.K., Toksöz M.F., Kovach R.L., Knight T.C.D., Lazarewicz A.R., Miller W.F., Nakamura Y., Sutto G. The Viking seismic experiment // Science. 1976. V. 194. № 4721. P. 1318–1321. <https://doi.org/10.1126/science.194.4721.1318>
- Arruego I., Apéstigue V., Jiménez-Martín J., Martínez-Oter J., Álvarez-Ríos F.J., González-Guerrero M., Rivas J., Azcue J., Martín I., Toledo D., and 3 co-authors. DREAMS-SIS: The Solar Irradiance Sensor on-board the ExoMars 2016 lander // Adv. Space Res. 2017. V. 60. P. 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.04.002>
- Arumov G.P., Bukharin A.V., Linkin V.M., Lipatov A.N., Lyash A.N., Makarov V.S., Pershin S.M., Tiurin A.V. Compact aerosol lidar for Martian atmosphere monitoring according to the NASA Mars Surveyor Program // ‘98 Proc. SPIE. 1999. V. 3688. P. 494. <https://doi.org/10.1117/12.337558>
- Atreya S.K., Wong A.-S., Renno N.O., Farrell W.M., Delory G.T., Sentman D.D., Cummer S.A., Marshall J.R., Raffkin S.C.R., Catling D.C. Oxidant enhancement in Martian dust devils and storms: Implications for life and habitability // Astrobiology. 2006. V. 6. P. 439–450. <https://doi.org/10.1089/ast.2006.6.439>
- Atreya S.K., Trainer M.G., Franz H.B., Wong M.H., Manning H.L.K., Malespin C.A., Mahaffy P.R., Conrad P.G., Brunner A.E., Leshin L.A., and 5 co-authors. Primordial argon isotope fractionation in the atmosphere of Mars measured by the SAM instrument on Curiosity and implications for atmospheric loss // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 5605–5609. <https://doi.org/10.1002/2013GL057763>
- Blanchard R.C., Desai P.N. Mars Phoenix entry, descent, and landing trajectory and atmosphere reconstruction // J. Spacecraft and Rockets. 2011. V. 48. P. 809–821. <https://doi.org/10.2514/1.46274>
- Chamberlain T.E., Cole H.L., Dutton R.G., Greene G.C., Tillman J.E. Atmospheric measurements on Mars: the Viking Meteorology Experiment // Am. Meteorol. Soc. Bull. 1976. V. 57. P. 1094. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1976\)057<1094:AMOMTV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1976)057<1094:AMOMTV>2.0.CO;2)
- Ciarletti V., Clifford S., Plettemeier D. Le Gall A., Hervé Y., Dorizon S., Quantin-Nataf C., Benedix W.-S., Schwenzer S., Pettinelli E., and 7 co-authors. The WISDOM radar: Unveiling the subsurface beneath the ExoMars Rover and identifying the best locations for drilling // Astrobiology. 2017. V. 17. P. 565–584. <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1532>
- Connerney J.E.P., Espley J.R., DiBraccio G.A., Gruesbeck J.R., Oliverson R.J., Mitchell D.L., Halekas J., Mazelle C., Brain D., Jakosky B.M. First results of the MAVEN magnetic field investigation // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 8819–8827. <https://doi.org/10.1002/2015GL065366>
- Conrad P.G., Malespin C.A., Franz H.B., Pepin R.O., Trainer M.G., Schwenzer S.P., Atreya S.K., Freissinet C., Jones J.H., Manning H., and 5 co-authors. In situ measurement of atmospheric krypton and xenon on Mars with Mars Science Laboratory // Earth and Planet. Sci. Lett. 2016. V. 454. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.08.028>
- Daerden F., Whiteway J.A., Neary L., Komguem L., Lemon M.T., Heavens N.G., Cantor B.A., Hébrard E., Smith M.D. A solar escalator on Mars: Self-lifting of dust layers by radiative heating // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 7319–7326. <https://doi.org/10.1002/2015GL064892>
- Dehant V., Le Maistre S., Baland R.-M., Bergeot N., Karatekin Ö., Péters M.-J., Rivoldini A., Lozano L.R., Temel O., Van Hoolst T., and 11 co-authors. The radio-science LaRa instrument onboard ExoMars 2020 to investigate the rotation and interior of Mars // Planet. and Space Sci. 2020. V. 180. id. 104776. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104776>

- Díaz Michelena M., Rivero M.Á., Romero S.F., Adeli S., Oliveira J.S., Henrich C., Aspás A., Parrondo M. Anisotropic MagnetoResistance (AMR) instrument to study the Martian magnetic environment from the surface: Expected scientific return // *Sol. Syst. Res.* 2023. V. 57. P. 307–323.
<https://doi.org/10.1134/S003809462304010X>
- Durry G., Li J.S., Vinogradov I., Titov A., Joly L., Cousin J., Decarpenterie T., Amarouche N., Liu X., Parvite B., Korablev O., Gerasimov M., Zéninari V. Near infrared diode laser spectroscopy of C₂H₂, H₂O, CO₂ and their isotopologues and the application to TDLAS, a tunable diode laser spectrometer for the Martian PHOBOS-GRUNT space mission // *Appl. Phys. B.* 2010. V. 99. P. 339–351.
<https://doi.org/10.1007/s00340-010-3924-y>
- Ehresmann B., Zeitlin C., Hassler D.M., Guo J., Wimmer-Schweingruber R.F., Berger T., Matthiä D., Reitz G. The Martian surface radiation environment at solar minimum measured with MSL/RAD // *Icarus.* 2023. V. 393. id. 115035.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115035>
- Esposito F., Colangeli L., Della Corte V., Molfese C., Palumbo P., Ventura S., Merrison J., Nørnberg P., Rodriguez-Gomez J.F., Lopez-Moreno J.J., and 7 co-authors. MEDUSA: Observation of atmospheric dust and water vapor close to the surface of Mars // *Int. J. Mars Sci. Expl.* 2011. V. 6. P. 1–12.
- Esposito F., Debei S., Bettanini C., Molfese C., Arruego Rodríguez I., Colombatti G., Harri A.-M., Montmessin F., Wilson C., Aboudan A., and 58 co-authors. The DREAMS experiment onboard the Schiaparelli Module of the ExoMars 2016 mission: Design, performances and expected results // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. id. 103.
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0535-0>
- Evlanov E.N., Zubkov B.V., Nenarokov D.F., Linkin V.M., Zavyalov M.A., Tyuryukanov P.M. Gas-discharge anemometer for the investigation of flow dynamics in rarefied gas media // *Cosmic Res.* 2001. V. 39. № 5. P. 453–458.
- Ferri F., Karatekin Ö., Lewis S.R., Forget F., Aboudan A., Colombatti G., Bettanini C., Debei S., Van Hove B., Dehant V., and 18 co-authors. ExoMars Atmospheric Mars Entry and Landing Investigations and Analysis (AMELIA) // *Space Sci. Rev.* 2019. V. 215. id. 8.
<https://doi.org/10.1007/s11214-019-0578-x>
- Folkner W.M., Yoder C.F., Yuan D.N., Standish E.M., Preston R.A. Interior structure and seasonal mass redistribution of Mars from radio tracking of Mars Pathfinder // *Science.* 1997. V. 278. P. 1749–1752.
<https://doi.org/10.1126/science.278.5344.1749>
- Forget F., Hourdin F., Fournier R., Hourdin C., Talagrand O., Collins M., Lewis S.R., Read P.L., Huot J.-P. Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1999. V. 104. P. 24155–24175.
<https://doi.org/10.1029/1999JE001025>
- Franz H.B., Mahaffy P.R., Webster C.R., Flesch G.J., Raaen E., Freissinet C., Atreya S.K., House C.H., McAdam A.C., Knudson C.A., and 12 co-authors. Indigenous and exogenous organics and surface-atmosphere cycling inferred from carbon and oxygen isotopes at Gale crater // *Nature Astron.* 2020. V. 4. P. 526–532.
<https://doi.org/10.1038/s41550-019-0990-x>
- Gerasimov M.V., Sapgir A.G., Zaitsev M.A., Aseev S.A., Vinogradov I.I., Szopa C., Coll P., Cabane M., Coscia D., Goesmann F., Würz P., Lasi D., Tulej M. The Martian gas-analytic package for the landing platform experiments of the ExoMars 2018 // *Proc. LPI.* 2014. id. 1242.
<https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2014/pdf/1242.pdf>
- Giardini D., Lognonné P., Banerdt W.B., Pike W.T., Christensen U., Ceylan S., Clinton J.F., van Driel M., Stähler S.C., Böse M., and 53 co-authors. The seismicity of Mars // *Nature Geosci.* 2020. V. 13. P. 205–212.
<https://doi.org/10.1038/s41561-020-0539-8>
- Gómez-Elvira J., Armiens C., Castañer L., Domínguez M., Genzer M., Gómez F., Haberle R., Harri A.-M., Jiménez V., Kahanpää H., and 29 co-authors. REMS: The environmental sensor suite for the Mars Science Laboratory rover // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 583–640.
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9921-1>
- Gudkova T.V., Lognonné P., Zharkov V.N., Raevsky S.N. On the scientific aims of the MISS seismic experiment // *Sol. Syst. Res.* 2014. V. 48. P. 11–12.
<https://doi.org/10.1134/S0038094614010043>
- Guzewich S.D., Fedorova A.A., Kahre M.A., Toigo A.D. Studies of the 2018/Mars Year 34 planet-encircling dust storm // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2020. V. 125 id. e06700.
<https://doi.org/10.1029/2020JE006700>
- Harri A.-M., Linkin V., Polkko J., Marov M., Pommereau J.-P., Lipatov A., Siili T., Manuilov K., Lebedev V., Lehto A., and 10 co-authors. Meteorological observations on Martian surface: Met-packages of Mars-96 small stations and penetrators planet // *Space. Sci.* 1998. V. 46. P. 779–793.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(98\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(98)00012-9)
- Harri A.-M., Pichkadze K., Zeleny L., Vazquez L., Schmidt W., Alexashkin S., Korablev O., Guerrero H., Heilimo J., Uspekensky M., and 22 co-authors. The MetNet vehicle: a lander to deploy environmental stations for local and global investigations of Mars // *Geophys. Instr., Method and Data Syst.* 2017. V. 6. P. 103–124.
<https://doi.org/10.5194/gi-6-103-2017>
- Hartogh P., Medvedev A.S., Kuroda T., Saito R., Villanueva G., Feofilov A.G., Kutepov A.A., Berger U. Description and climatology of a new general circulation model of the Martian atmosphere // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2005. V. 110. id. E11008.
<https://doi.org/10.1029/2005JE002498>
- Hassler D.M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Böttcher S., Martin C., Andrews J., Böhm E., Brinza D.E., Bullock M.A., Burmeister S., and 15 co-authors. The Radiation Assessment Detector (RAD) investigation // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 503–558.
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9913-1>
- Hassler D.M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Ehresmann B., Rafkin S., Eigenbrode J.L., Brinza D.E.,

- Weigle G., Böttcher S., Böhm E., and 438 co-authors. Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover // *Science*. 2014. V. 343. № 6169. id. 1244797.
<https://doi.org/10.1126/science.1244797>
- Hess S.L., Ryan J.A., Tillman J.E., Henry R.M., Leovy C.B. The annual cycle of pressure on Mars measured by Viking Landers 1 and 2 // *Geophys. Res. Lett.* 1980. V. 7. P. 197–200.
<https://doi.org/10.1029/GL007i003p00197>
- Hofer L., Wurz P., Buch A., Cabane M., Coll P., Coscia D., Gerasimov M., Lasi D., Sapgir A., Szopa C., Tulej M. Prototype of the gas chromatograph-mass spectrometer to investigate volatile species in the lunar soil for the Luna-Resurs mission // *Planet. and Space Sci.* 2015. V. 111. P. 126–133.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.03.027>
- Holstein-Rathlou C., Maue A., Withers P. Atmospheric studies from the Mars Science Laboratory entry, descent and landing atmospheric structure reconstruction // *Planet. and Space Sci.* 2016. V. 120. P. 15–23.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.10.015>
- Huang Q., Schmerr N.C., King S.D., Banerdt W.B. Seismic detection of a deep mantle discontinuity within Mars by InSight // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2022. V. 119. id. e2204474119.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2204474119>
- Jakosky B.M., Zent A.P., Zurek R.W. The Mars water cycle: Determining the role of exchange with the regolith // *Icarus*. 1997. V. 130. P. 87–95.
<https://doi.org/10.1006/Icarus.1997.5799>
- Jimenez-Martín J., García Menéndez E., Gonzalez-Guerrero Bartolomé M., Martínez-Oter J., Apéstigue-Palacio V., de Mingo J.R., Rivas J., Serrano F., Montalvo S., García-Llases A., Arruego I. Solar Irradiance Sensor of RDM ExoMars 2022 calibration // *Proc. SPIE*. 2023. V. 12777. id. 1277774.
<https://doi.org/10.1117/12.2691378>
- Johnson C.L., Mittelholz A., Langlais B., Russell C.T., Ansan V., Banfield D., Chi P.J., Fillingim M.O., Forget F., Haviland H.F., and 14 co-authors. Crustal and time-varying magnetic fields at the InSight landing site on Mars // *Nature Geosci.* 2020. V. 13. P. 199–204.
<https://doi.org/10.1038/s41561-020-0537-x>
- Kahre M., Murphy J., Newman C., Wilson R., Cantor B., Lemmon M., Wolff M. The Mars dust cycle // *The Atmosphere and Climate of Mars* / Eds: Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. P. 295–337.
<https://doi.org/10.1017/9781139060172.010>
- Kahre M.A., Haberle R.M., Wilson R.J., Urata R.A., Steakley K.E., Brecht A.S., Bertrand T., Kling A., Batterson C.M., Hartwick V., Harman C.E., Gkouvelis L. The NASA Ames legacy Mars global climate model: Radiation code error correction and new baseline water cycle simulation // *Icarus*. 2023. V. 400. id. 115561.
<https://doi.org/10.1016/j.Icarus.2023.115561>
- Karlgard C.D., Korzun A.M., Schoenenberger M., Bonfiglio E.P., Kass D.M., Grover M.R. Mars InSight entry, descent, and landing trajectory and atmosphere reconstruction // *J. Spacecraft and Rockets*. 2021. V. 58. P. 865–878.
<https://doi.org/10.2514/1.A34913>
- Karlgard C.D., Schoenenberger M., Dutta S., Way D.W. Mars entry, descent, and landing instrumentation 2 trajectory, aerodynamics, and atmosphere reconstruction // *J. Spacecraft and Rockets*. 2023. V. 60. P. 199–214.
<https://doi.org/10.2514/1.A35440>
- Kawamura T., Clinton J.F., Zenhäusern G., Ceylan S., Horleston A.C., Dahmen N.L., Duran C., Kim D., Plasman M., Stähler S.C., and 8 co-authors. S1222a – the largest Marsquake detected by InSight // *Geophys. Res. Lett.* 2023. V. 50. id. e2022GL101543.
<https://doi.org/10.1029/2022GL101543>
- Knapmeyer-Endrun B., Panning M.P., Bissig F., Rakshit J., Khan A., Kim D., Lekić V., Tauzin B., Tharimena S., Plasman M., and 29 co-authors. Thickness and structure of the Martian crust from InSight seismic data // *Science*. 2021. V. 373. № 6553. P. 438–443.
<https://doi.org/10.1126/science.abf8966>
- Knutsen E.W., Montmessin F., Verdier L., Lacombe G., Lefèvre F., Ferron S., Giuranna M., Wolkenberg P., Fedorova A., Trokhimovskiy A., Korablev O. Water vapor on Mars: A refined climatology and constraints on the near-surface concentration enabled by synergistic retrievals // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2022. V. 127. id. e07252.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007252>
- Kok J.F., Renno N.O. Electrification of wind-blown sand on Mars and its implications for atmospheric chemistry // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № 5. id. L05202.
<https://doi.org/10.1029/2008GL036691>
- Kolmasova I., Santolik O., Skalsky A. Anticipated plasma wave measurement onboard ExoMars 2020 surface platform // *Proc. 8th Int. Workshop on planets, solar and heliospheric radio emissions*, Graz, Austria, October 25–27, 2016. 2017. P. 487.
<https://doi.org/10.1553/PRE8s487>
- Konopliv A.S., Park R.S., Folkner W.M. An improved JPL Mars gravity field and orientation from Mars orbiter and lander tracking data // *Icarus*. 2016. V. 274. P. 253–260.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.02.052>
- Konopliv A.S., Park R.S., Rivoldini A., Baland R.-M., Le Maistre S., Van Hoolst T., Yseboodt M., Dehant V. Detection of the Chandler wobble of Mars from orbiting spacecraft // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. id. e90568.
<https://doi.org/10.1029/2020GL090568>
- Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A., Fedorova A.A., Shakun A.V., Grigoriev A.V., Moshkin B.E., Ignatiev N.I., Forget F., Lefèvre F., and 64 co-authors. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. id. 7.
<https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6>
- Kuchynka P., Folkner W.M., Konopliv A.S., Parker T.J., Park R.S., Le Maistre S., Dehant V. New constraints on Mars rotation determined from radiometric tracking of the Opportunity Mars Exploration Rover // *Icarus*. 2014. V. 229. P. 340–347.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.11.015>

- Kurgansky M.V.* Statistical distribution of atmospheric dust devils on Earth and Mars // *Boundary-Layer Meteorol.* 2022. V. 184. P. 381–400.
<https://doi.org/10.1007/s10546-022-00713-w>
- Langlais B., Thébaud E., Houliéz A., Purucker M.E.* A new model of the crustal magnetic field of Mars using MGS and MAVEN // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2019. V. 124. P. 1542–1569.
- Le Maistre S., Péters M.-J., Marty J.-C., Dehant V.* On the impact of the operational and technical characteristics of the LaRa experiment on the determination of Mars' nutation // *Planet and Space Sci.* 2020. V. 180. id. 104766
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104766>
- Lefèvre F., Trokhimovskiy A., Fedorova A., Baggio L., Lacombe G., Määtänen A., Bertaux J.-L., Forget F., Millour E., Venot O., Bénilan Y., Korabiev O., Montmessin F.* Relationship between the ozone and water vapor columns on Mars as observed by SPICAM and calculated by a Global Climate Model // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2021. V. 126. id. e06838.
<https://doi.org/10.1029/2021JE006838>
- Linkin V., Harri A.-M., Lipatov A., Belostotskaja K., Derbunovich B., Ekonomov A., Khloustova L., Kremnev R., Makarov V., Martinov B., and 11 co-authors.* A sophisticated lander for scientific exploration of Mars: Scientific objectives and implementation of the Mars-96 small station // *Planet. and Space Sci.* 1998. V. 46. P. 717–737.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(98\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(98)00008-7)
- Liu J., Li C., Zhang R., Rao W., Cui X., Geng Y., Jia Y., Huang H., Ren X., Yan W., and 13 co-authors.* Geomorphic contexts and science focus of the Zhurong landing site on Mars // *Nat. Astron.* 2022. V. 6. P. 65–71.
<https://doi.org/10.1038/s41550-021-01519-5>
- Lognonné P., Zharkov V.N., Karczewski J.F., Romanowicz B., Menvielle M., Poupinet G., Briant B., Cavoit C., Desauter A., Dole B., et al.* The seismic OPTIMISM experiment // *Planet. and Space Sci.* 1998. V. 46. P. 739–747.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(98\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(98)00009-9)
- Lognonné P., Giardini D., Banerdt B., Gagnepain-Beyneix J., Mocquet A., Spohn T., Karczewski J.F., Schibler P., Cacho S., Pike W.T., and 5 co-authors.* The NetLander very broad band seismometer // *Planet. and Space Sci.* 2000. V. 48. P. 1289–1302.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(00\)00110-0](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(00)00110-0)
- Lognonné P., Banerdt W.B., Giardini D., Pike W.T., Christensen U., Laudet P., de Raucourt S., Zweifel P., Calcutt S., Bierwirth M., and 161 co-authors.* SEIS: InSight's seismic experiment for internal structure of Mars // *Space Sci. Rev.* 2019. V. 215. id. 12.
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0574-6>
- Magalhães J.A., Schofield J.T., Seiff A.* Results of the Mars Pathfinder atmospheric structure investigation // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1999. V. 104. P. 8943–8955.
<https://doi.org/10.1029/1998JE900041>
- Mahaffy P.R., Webster C.R., Atreya S.K., Franz H., Wong M., Conrad P.G., Harpold D., Jones J.J., Leshin L.A., Manning H., and 439 co-authors.* Abundance and isotopic composition of gases in the Martian atmosphere from the Curiosity rover // *Science.* 2013. V. 341. № 6143. P. 263–266.
<https://doi.org/10.1126/science.1237966>
- Malakhov A.V., Mitrofanov I.G., Golovin D.V., Litvak M.L., Sanin A.B., Djachkova M.V., Lukyanov N.V.* High resolution map of water in the Martian regolith observed by FRENDE neutron telescope onboard ExoMars TGO // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2022. V. 127. id. e07258.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007258>
- Manukin A.B., Gorshkov A.N., Shlyk A.F.* GRAS-F seismogravimeter for measuring gravity-inertial fields on the surface of Phobos // *Sol. Syst. Res.* 2010. V. 44. P. 417–422.
<https://doi.org/10.1134/S0038094610050096>
- Martin R.L., Kok J.F.* Wind-invariant saltation heights imply linear scaling of aeolian saltation flux with shear stress // *Science Adv.* 2017. V. 3. id. e1602569.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1602569>
- Martín-Torres J., Zorzano M.-P., Soria-Salinas Á., Nazarious M.I., Konatham S., Mathanlal T., Ramachandran A.V., Ramírez-Luque J.-A., Mantas-Nakhai R.* The HABIT (HabitAbility: Brine Irradiation and Temperature) environmental instrument for the ExoMars 2022 Surface Platform // *Planet. and Space Sci.* 2020. V. 190. id. 104968.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104968>
- Mitrofanov I.G., Kozyrev A.S., Lisov D.I., Litvak M.L., Malakhov A.A., Mokrousov M.I., Benkhoff J., Owens A., Schulz R., Quarati F.* The Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (MGNS) onboard the Mercury Planetary Orbiter of the BepiColombo mission: Design updates and first measurements in space // *Space Sci. Rev.* 2021. V. 217. id. 67.
<https://doi.org/10.1007/s11214-021-00842-7>
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Nikiforov S.Y., Jun I., Bobrovniyskiy Y.I., Golovin D.V., Grebennikov A.S., Fedosov F.S., Kozyrev A.S., Lisov D.I., and 8 co-authors.* The ADRON-RM instrument onboard the ExoMars rover // *Astrobiology.* 2017. V. 17. P. 585–594.
<https://doi.org/10.1089/ast.2016.1566>
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Varenikov A.B., Barmaikov Y.N., Behar A., Bobrovniyskiy Y.I., Bogolubov E.P., Boynton W.V., Harshman K., Kan E., and 13 co-authors.* Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment onboard NASA's Mars Science Laboratory // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 559–582.
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9924-y>
- Mitrofanov I., Malakhov A., Djachkova M., Golovin D., Litvak M., Mokrousov M., Sanin A., Svedhem H., Zelenyi L.* The evidence for unusually high hydrogen abundances in the central part of Valles Marineris on Mars // *Icarus.* 2022a. V. 374. id. 114805.
<https://doi.org/10.1016/j.Icarus.2021.114805>
- Mitrofanov I.G., Nikiforov S.Y., Djachkova M.V., Lisov D.I., Litvak M.L., Sanin A.B., Vasavada A.R.* Water and chlorine in the Martian subsurface along the traverse of NASA's Curiosity rover: 1. DAN measurement profiles along the traverse // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2022b. V. 127. id. e2022JE007327.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007327>

- Mitrofanov I., Malakhov A., Bakhtin B., Golovin D., Kozyrev A., Litvak M., Mokrousov M., A. Sanin, Tretyakov V., Vostrukhin A., and 16 co-authors.* Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FRIEND) onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. id. 86.
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0522-5>
- Mittelholz A., Johnson C.L., Thorne S.N., Joy S., Barrett E., Fillingim M.O., Forget F., Langlais B., Russell C.T., Spiga A., Smrekar S., Banerdt W.B.* The origin of observed magnetic variability for a sol on Mars from In-Sight // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2020. V. 125. № 9. id. e2020JE006505.
<https://doi.org/10.1029/2020JE006505>
- Mokrousov M.I., Golovin D.V., Mitrofanov I.G., Anikin A.A., Kozyrev A.S., Litvak M.L., Malakhov A.V., Nikiforov S.Y., Pekov A.N., Sanin A.B., Tretyakov V.I.* ADRON: Active Spectrometer of Neutron and Gamma Radiation of the Moon and Mars // *Phys. Particles Nuclei Lett.* 2022. V. 19. P. 744–764.
<https://doi.org/10.1134/S1547477122060164>
- Montabone L., Forget F., Millour E., Wilson R.J., Lewis S.R., Cantor B., Kass D., Kleinböhl A., Lemmon M.T., Smith M.D., Wolff M.J.* Eight-year climatology of dust optical depth on Mars // *Icarus.* 2015. V. 251. P. 65–95.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.12.034>
- Montmessin F., Smith M., Langevin Y., Mellon M., Fedorova A.* The water cycle // *The Atmosphere and Climate of Mars* / Eds: Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. P. 338–373.
<https://doi.org/10.1017/9781139060172.011>
- Musiolik G., Kruss M., Demirci T., Schirnski B., Teiser J., Daerden F., Smith M.D., Neary L., Wurm G.* Saltation under Martian gravity and its influence on the global dust distribution // *Icarus.* 2018. V. 306. P. 25–31.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.01.007>
- Navarro T., Madeleine J.-B., Forget F., Spiga A., Millour E., Montmessin F., Määttänen A.* Global climate modeling of the Martian water cycle with improved microphysics and radiatively active water ice clouds // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2014. V. 119. P. 1479–1495.
<https://doi.org/10.1002/2013JE004550>
- Neakrase L.D.V., Balme M.R., Esposito F., Kelling T., Klose M., Kok J.F., Marticorena B., Merrison J., Patel M., Wurm G.* Particle lifting processes in dust devils // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 203. P. 347–376.
<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0296-6>
- Neary L., Daerden F.* The GEM–Mars general circulation model for Mars: Description and evaluation // *Icarus.* 2018. V. 300. P. 458–476.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.09.028>
- Newman C.E., Richardson M.I.* The impact of surface dust source exhaustion on the Martian dust cycle, dust storms and interannual variability, as simulated by the MarsWRF General Circulation Model // *Icarus.* 2015. V. 257. 47–87.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.03.030>
- Pavlov A.K., Shelegedin V.N., Vdovina M.A., Pavlov A.A.* Growth of microorganisms in Martian-like shallow subsurface conditions: Laboratory modelling // *Int. J. Astrobiol.* 2010. V. 9. P. 51–58.
<https://doi.org/10.1017/S1473550409990371>
- Péters M.-J., Le Maistre S., Yseboodt M., Marty J.-C., Rivoldini A., Van Hoolst T., Dehant V.* LaRa after RISE: Expected improvement in the Mars rotation and interior models // *Planet. and Space Sci.* 2020. V. 180. № 4. id. 104745.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104745>
- Petrosyan A., Galperin B., Larsen S.E., Lewis S.R., Määttänen A., Read P.L., Renno N., Rogberg L.P.H.T., Savijärvi H., Siili T., Spiga A., Toigo A., Vázquez L.* The Martian atmospheric boundary layer // *Rev. Geophys.* 2011. V. 49. № 3. id. RG3005.
<https://doi.org/10.1029/2010RG000351>
- Read P., Galperin B., Larsen S., Lewis S.R., Määttänen A., Petrosyan A., Renno N., Savijärvi H., Siili T., Spiga A.* The Martian planetary boundary layer // *The Atmosphere and Climate of Mars* / Eds: Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. P. 172–202.
<https://doi.org/10.1017/9781139060172.007>
- Renno N.O., Wong A.-S., Atreya S.K., de Pater I., Roos-Serote M.* Electrical discharges and broadband radio emission by Martian dust devils and dust storms // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. id. 2140.
<https://doi.org/10.1029/2003GL018779>
- Rodin A., Vinogradov I., Zenevich S., Spiridonov M., Gazizov I., Kazakov V., Meshcherinov V., Golovin I., Kozlova T., Lebedev Y., and 11 co-authors.* Martian Multi-channel Diode Laser Spectrometer (M-DLS) for in-situ atmospheric composition measurements on Mars onboard ExoMars-2022 Landing Platform // *Applied Sci.* 2020. V. 10. № 24. id. 8805.
<https://doi.org/10.3390/app10248805>
- Rodriguez-Manfredi J.A., de la Torre Juárez M., Alonso A., Apéstigue V., Arruego I., Atienza T., Banfield D., Bolland J., Carrera M.A., Castañer L., and 76 co-authors.* The Mars Environmental Dynamics Analyzer, MEDA. A suite of environmental sensors for the Mars 2020 mission // *Space Sci. Rev.* 2021. V. 217. id. 48.
<https://doi.org/10.1007/s11214-021-00816-9>
- Sagan C., Bagnold R.A.* Fluid transport on Earth and Aeolian transport on Mars // *Icarus.* 1975. V. 26. 209–218.
[https://doi.org/10.1016/0019-1035\(75\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0019-1035(75)90080-9)
- Seiff A., Kirk D.B.* Structure of the atmosphere of Mars in summer at mid-latitudes // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. P. 4364–4378.
<https://doi.org/10.1029/JS082i028p04364>
- Seiff A., Tillman J.E., Murphy J.R., Schofield J.T., Crisp D., Jeffrey R.B., LaBaw C., Mahoney C., Mihalov J.D., Wilson G.R., Haberle R.* The atmosphere structure and meteorology instrument on the Mars Pathfinder lander // *J. Geophys. Res.: Planets.* 1997. V. 102. P. 4045–4056.
<https://doi.org/10.1029/96JE03320>
- Semkova J., Dachev T., Matviichuk Y., Koleva R., Tomov B., Baynov P., Petrov V., Nguyen V., Siegrist M., Chene J., d'Uston C., Cotin F.* Dosimetric investigations on Mars-96 mission // *Adv. Space Res.* 1994. V. 14. P. 707–710.
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90530-4](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)90530-4)

- Semkova J., Koleva R., Benghin V., Dachev T., Matviichuk Y., Tomov B., Krastev K., Maltchev S., Dimitrov P., Bankov N., and 10 co-authors.* Results from radiation environment measurements aboard ExoMars Trace Gas Orbiter in Mars science orbit in May 2018–December 2019 // *Icarus*. 2021. V. 361. id. 114264. <https://doi.org/10.1016/j.Icarus.2020.114264>
- Shakun A., Korablev O., Moshkin B., Grigoriev A., Ignatiev N., Maslov I., Sazonov O., Patsaev D., Kungurov A., Santos-Skripko A., and 7 co-authors.* Fourier transform spectrometers for remote sensing of planetary atmospheres and surfaces // *CEAS Space J.* 2017. V. 9. P. 399–409. <https://doi.org/10.1007/s12567-017-0176-2>
- Shakun A., Ignatiev N., Luginin M., Grigoriev A., Moshkin B., Grassi D., Arnold G., Maturilli A., Kungurov A., Makarov V., and 11 co-authors.* ACS/TIRVIM: Calibration and first results // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10765. id. 107650E. <https://doi.org/10.1117/12.2322163>
- Shakun A., Kungurov A., Sazonov O., Stupin I., Arnold G., Grigoriev A., Korablev O.* Two-coordinate pointing and tracking system for an infrared Fourier-transform spectrometer // *Proc. SPIE*. 2019a. V. 11128. id. 111280H. <https://doi.org/10.1117/12.2535444>
- Shakun A., Santos-Skripko A., Sazonov O., Maslov I., Ignatiev N., Stupin I., Arnold G., Grigoriev A., Korablev O.* Interferometer with single-axis robot: design, alignment and performance // *Proc. SPIE*. 2019b. V. 11128. id. 111280G. <https://doi.org/10.1117/12.2535436>
- Smith M.D., Wolff M.J., Spanovich N., Ghosh A., Banfield D., Christensen P.R., Landis G.A., Squyres S.W.* One Martian year of atmospheric observations using MER Mini-TES // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2006. V. 111. id. E12S13. <https://doi.org/10.1029/2006JE002770>
- Smith M., Bougher S., Encrenaz T., Forget F., Kleinböhl A.* Thermal structure and composition // *The Atmosphere and Climate of Mars* / Eds: Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. P. 42–75. <https://doi.org/10.1017/9781139060172.004>
- Smith M.D., Daerden F., Neary L., Khayat A.S.J., Holmes J.A., Patel M.R., Villanueva G., Liuzzi G., Thomas I.R., Ristic B., Bellucci G., Lopez-Moreno J.J., Vandaele A.C.* The climatology of carbon monoxide on Mars as observed by NOMAD nadir-geometry observations // *Icarus*. 2021. V. 362. id. 114404. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114404>
- Soria-Salinas Á., Zorzano M.-P., Mantas-Nakhai R., Martín-Torres J.* Wind retrieval from temperature measurements from the Rover Environmental Monitoring Station/Mars Science Laboratory // *Icarus*. 2020. V. 346. id. 113785. <https://doi.org/10.1016/j.Icarus.2020.113785>
- Spiga A., Banfield D., Teanby N.A., Forget F., Lucas A., Kenda B., Rodriguez Manfredi J.A., Widmer-Schmid R., Murdoch N., Lemmon M.T., and 27 co-authors.* Atmospheric science with InSight // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. id. 109. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0543-0>
- Stähler S.C., Khan A., Banerdt W.B., Lognonné P., Giardini D., Ceylan S., Drilleau M., Duran A.C., Garcia R.F., Huang Q., and 31 co-authors.* Seismic detection of the Martian core // *Science*. 2021. V. 373. P. 443–448. <https://doi.org/10.1126/science.abi7730>
- Taylor P.A., Catling D.C., Daly M., Dickinson C.S., Gunnlaugsson H.P., Harri A.-M., Lange C.F.* Temperature, pressure, and wind instrumentation in the Phoenix meteorological package // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. id. E00A10. <https://doi.org/10.1029/2007JE003015>
- Todd J.F.J., Barber S.J., Wright I.P., Morgan G.H., Morse A.D., Sheridan S., Leese M.R., Maynard J., Evans S.T., Pilling C.T., and 7 co-authors.* Ion trap mass spectrometry on a comet nucleus: The Ptolemy instrument and the Rosetta space mission // *J. Mass Spectrometry*. 2007. V. 42. P. 1–10. <https://doi.org/10.1002/jms.1147>
- Toigo A.D., Richardson M.I., Wilson R.J., Wang H., Ingersoll A.P.* A first look at dust lifting and dust storms near the south pole of Mars with a mesoscale model // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2002. V. 107. id. 5050. <https://doi.org/10.1029/2001JE001592>
- Toledo D., Rannou P., Pommereau J.-P., Sarkissian A., Foujols T.* Measurement of aerosol optical depth and sub-visual cloud detection using the optical depth sensor (ODS) // *Atmos. Measurements Techniq.* 2016. V. 9. P. 455–467. <https://doi.org/10.5194/amt-9-455-2016>
- Toledo D., Arruego I., Apéstitue V., Jiménez J.J., Gómez L., Yela M., Rannou P., Pommereau J.-P.* Measurement of dust optical depth using the solar irradiance sensor (SIS) onboard the ExoMars 2016 EDM // *Planet. and Space Sci.* 2017. V. 138. P. 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.01.015>
- Vago J., Witasse O., Svedhem H., Baglioni P., Haldemann A., Gianfiglio G., Blancquaert T., McCoy D., de Groot R.* ESA ExoMars program: The next step in exploring Mars // *Sol. Syst. Res.* 2015a. V. 49. P. 518–528. <https://doi.org/10.1134/S0038094615070199>
- Vago J.L., Lorenzoni L., Calantropio F., Zashchirinskiy A.M.* Selecting a landing site for the ExoMars 2018 mission // *Sol. Syst. Res.* 2015b. V. 49. P. 538–542. <https://doi.org/10.1134/S0038094615070205>
- Vago J.L., Westall F., Pasteur Instrument Teams, Landing Site Selection Working Group, Other Contributors, Coates A.J., Jaumann R., Korablev O., Ciarletti V., Mitrofanov I., and 66 co-authors.* Habitability on early Mars and the search for biosignatures with the ExoMars rover // *Astrobiology*. 2017. V. 17. P. 471–510. <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1533>
- Webster C.R., Mahaffy P.R., Flesch G.J., Niles P.B., Jones J.H., Leshin L.A., Atreya S.K., Stern J.C., Christensen L.E., Owen T., and 4 co-authors.* Isotope ratios of H, C, and O in CO₂ and H₂O of the Martian atmosphere // *Science*. 2013. V. 341. № 6143. P. 260–263. <https://doi.org/10.1126/science.1237961>

- Wilson R.J., Hamilton K.* Comprehensive model simulation of thermal tides in the Martian atmosphere // *J. Atmos. Sci.* 1996. V. 53. № 9. P. 1290–1326.
doi:10.1175/1520-0469(1996)053<1290CMSOTT>2.0.CO;2
- Withers P., Smith M.D.* Atmospheric entry profiles from the Mars exploration rovers Spirit and Opportunity // *Icarus*. 2006. V. 185. P. 133–142.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.06.013>
- Wolff M.J., Smith M.D., Clancy R., Spanovich N., Whitney B., Lemmon M.T., Bandfield J.L., Banfield D., Ghosh A., Landis G., Christensen P.R., Bell III J.F., Squyres S.W.* Constraints on dust aerosols from the Mars Exploration Rovers using MGS overflights and Mini-TES. *J. Geophys. Res.: Planets*. 2006. V. 111. id. E12S17.
<https://doi.org/10.1029/2006je002786>
- Wolff M.J., Smith M.D., Clancy R.T., Arvidson R., Kahre M., Seelos IV F., Murchie S., Savijärvi H.* Wavelength dependence of dust aerosol single scattering albedo as observed by the Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2009. V. 114. id. E00D04.
<https://doi.org/10.1029/2009JE003350>
- Wong M.H., Atreya S.K., Mahaffy P.N., Franz H.B., Malespin C., Trainer M.G., Stern J.C., Conrad P.G., Manning H.L.K., Pepin R.O., and 7 co-authors.* Isotopes of nitrogen on Mars: Atmospheric measurements by Curiosity's mass spectrometer // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 6033–6037.
<https://doi.org/10.1002/2013GL057840>
- Yoder C.F., Standish E.M.* Martian precession and rotation from Viking lander range data // *J. Geophys. Res.: Planets*. 1997. V. 102. P. 4065–4080.
<https://doi.org/10.1029/96JE03642>
- Zelenyi L.M., Korablev O.I., Rodionov D.S., Novikov B.S., Marchenkov K.I., Andreev O.N., Larionov E.V.* Scientific objectives of the scientific equipment of the landing platform of the ExoMars-2018 mission // *Sol. Syst. Res.* 2015. V. 49. P. 509–517.
<https://doi.org/10.1134/S0038094615070229>
- Zharkov V.N.* The internal structure of Mars: A key to understanding the origin of terrestrial planets // *Sol. Syst. Res.* 1996. V. 30. P. 456–465.