

Прибор ODS проекта «ЭкзоМарс-2022»: устройство, основные характеристики и результаты лабораторных калибровок

В. С. Хоркин^{1,4}, Ю. С. Доброленский¹, О. И. Кораблев¹, Н. А. Вязоветский¹,
И. А. Дзюбан¹, А. Ю. Титов¹, А. А. Федорова¹, А. Г. Сапгир¹, Д. Толедо²,
Ж.-П. Помро³, П. Ранну²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: vs_khorkin@mail.ru

² *Национальный институт аэрокосмической техники, Мадрид, 28850, Испания*

³ *Лаборатория атмосферных и космических наблюдений,
Версальский университет Сен-Кантен, Гуанкур, 78280, Франция*

⁴ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

Представлен прибор ODS (*англ.* Optical Depth Sensor), разработанный в Институте космических исследований РАН для проекта «ЭкзоМарс-2022». Прибор ODS предназначен для долговременной работы на поверхности Марса, а именно для ежедневного измерения оптической толщины пыли и конденсационного аэрозоля в атмосфере планеты по освещённости её поверхности. Для участия в проекте «ЭкзоМарс-2022» прибор ODS был модернизирован и прошёл полный цикл наземных испытаний. Описано устройство прибора, его оптическая схема, рассмотрены спектральные характеристики двух оптических каналов. Также в работе даны параметры входящего в состав прибора датчика температуры. Приведены результаты лабораторных калибровок параметров прибора, таких как поле зрения, спектральные характеристики, а также калибровки датчика температуры ODS. В эксперименте установлено, что прибор обладает спектральным пропусканием в диапазонах 350–450 и 740–1030 нм, поле зрения прибора составляет от 18 до 33° и от 35 до 45° по зенитному углу. Прибор был испытан в диапазоне температуры от –40 до +40 °С.

Ключевые слова: «ЭкзоМарс-2022», оптическая толщина атмосферы, поле зрения, калибровки

Одобрена к печати: 08.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-72-84

Введение

Прибор ODS (Optical Depth Sensor) предназначался для научной миссии ЭкзоМарс-2022 и был установлен на посадочную платформу в составе метеокомплекса (Zeleniy et al., 2015). Основной задачей ODS в ходе этой миссии являлся ежедневный мониторинг состояния атмосферы Марса. Известно, что в атмосфере Марса наблюдается большое количество пылевого аэрозоля (Haberle et al., 2017), причём его количество сильно зависит от сезона. В спокойный сезон (при L_s в диапазоне 0–135°, L_s — ареоцентрическая долгота Марса), который характеризуется низким содержанием пыли в атмосфере, её оптическая толщина не превышает значения $\tau = 1$. Однако в пылевой сезон (L_s в диапазоне 135–360°) содержание пыли в атмосфере возрастает и могут наблюдаться локальные и глобальные пылевые бури (Cantor, 2007; Guzewich et al., 2019; Haberle et al., 2017), во время которых оптическая толщина атмосферы достигает $\tau = 5$ и более.

Аэрозоли — важная составляющая в энергетическом балансе атмосферы Марса. Пыль, взвешенная в атмосфере, эффективно поглощает солнечное излучение и нагревается, тем самым нагревая атмосферу Марса. Кроме того пыль влияет на циклы диоксида углерода (CO_2) и воды на Марсе, изменяя альбедо поверхности и выступая ядрами конденсации в атмосфере (Fedorova et al., 2004; Haberle et al., 2017; Montmessin et al., 2002; Vincendon et al., 2015). Длительная работа прибора ODS на поверхности Марса позволяет получить данные об общей оптической толщине атмосферы в зависимости от времени/сезона. Используя данные ODS,

полученные при больших солнечных зенитных углах (в утренние и вечерние часы), можно определить оптическую толщину облачного слоя (Toledo, 2015; Toledo et al., 2016a, b). Это позволяет изучать не только характеристики атмосферного аэрозоля, но и облачного слоя, который является важной частью климата Марса. В частности, конденсационные облака из водяного льда играют ключевую роль в перераспределении воды по планете и оказывают влияние на радиационный баланс атмосферы (Wolff et al., 2019, 2022). Кроме того, знание количества пыли в течение всего марсианского года позволит оценить степень загрязнения солнечных батарей и более точно планировать ресурс будущих научных миссий (Haberle et al., 2017; Lorenz et al., 2021). Поэтому для измерения оптической толщины атмосферы и определения параметров пылевого аэрозоля, взвешенного в ней, на посадочную платформу миссии «ЭкзоМарс-2022» был установлен прибор ODS (в настоящее время миссия отменена).

Впервые прибор на этом принципе был разработан во Франции в конце 1980-х гг. для малых посадочных станций проекта «Марс-96» (Harri et al., 1998; Linkin et al., 1998). Прибор состоял из кварцевой полусферы, в центре которой размещался оптический волновод. На поверхность полусферы было нанесено непрозрачное покрытие, формирующее поле зрения прибора. Проходя кварцевую полусферу, свет через волновод попадал на светофильтры и фотодетекторы (Harri et al., 1998). Таким образом, общий принцип работы прибора заключался в следующем: в течение суток он измерял либо рассеянное атмосферой солнечное излучение, либо сумму рассеянного и прямого излучения, что позволяло определять оптическую толщину атмосферы. Также в приборе использовались несколько спектральных каналов с установленными в них разными светофильтрами. Это позволяло определить оптическую толщину атмосферы на разных длинах волн, а также параметры аэрозоля, взвешенного в атмосфере. Концепция двух спектральных каналов, а также сформированного поля зрения сохранялась во всех последующих приборах (Toledo, 2015; Tran et al., 2005).

Помимо применения прибора в космических миссиях, эксперимент ODS был успешно испытан в условиях земной атмосферы (Toledo, 2015; Toledo et al., 2016b). Были проведены две успешные кампании по измерению оптических свойств атмосферы в Буркина-Фасо, г. Уагадугу, в 2004–2005 гг. (Toledo et al., 2016b) и в Бразилии, г. Бауру, в 2012–2013 гг. (Toledo, 2015). Полученные при помощи прибора ODS результаты измерений оптической толщины атмосферы сравнивались с результатами измерений приборов сети AERONET, и было получено хорошее их совпадение (Holben et al., 1998; Toledo, 2015). Также при помощи настоящей версии прибора ODS в 2021 г. на территории Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) была проведена серия натуральных измерений оптической толщины атмосферы (Хоркин и др., 2023).

Для российско-европейской миссии «ЭкзоМарс-2022» (Zelenyi et al., 2015) прибор был адаптирован для установки на посадочную платформу космического аппарата. При сохранении общей концепции и принципиальной оптической схемы в ИКИ РАН был разработан, изготовлен и испытан новый прибор. В настоящей статье приводятся основные характеристики новой версии ODS, его оптическая схема, спектральные характеристики, а также результаты проведенных лабораторных калибровок. Подробно описана конструкция прибора и принцип его работы, обсуждаются лабораторные измерения поля зрения ODS и пропускания светофильтров каждого канала. Приведены результаты температурных калибровок термодатчика и коэффициентов усиления логарифмических усилителей, установленных в каждом из оптических каналов.

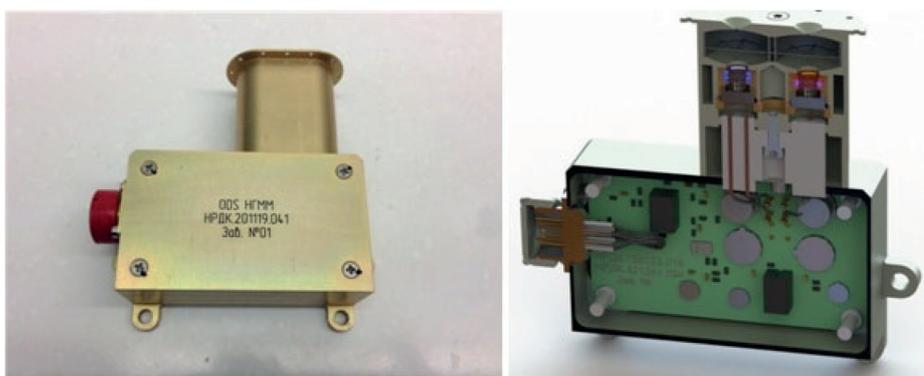
Принцип работы и устройство прибора ODS

Прибор ODS располагался на посадочной платформе миссии «ЭкзоМарс-2022» и предназначался для ежедневного мониторинга состояния атмосферы Марса, а также изучения взаимодействия атмосферы и поверхности планеты. Общий вид ODS показан на *рис. 1а, б* (см. с. 74), а его основные характеристики приведены ниже. ODS отличаются малые габариты и масса, а также широкий диапазон рабочей температуры. Использование усилителей сиг-

нала позволяет регистрировать как рассеянное в атмосфере оптическое излучение (плотность светового потока $S \sim 10^{-6}$ Вт/м²), так и прямое солнечное излучение ($S \sim 10^2$ Вт/м²). В отличие от французского прототипа, в данном исполнении прибор представляет собой моноблок, который можно условно разделить на «оптическую» и «электрическую» часть. Оптическая (верхняя на *рис. 1а, б*) часть прибора включает в себя оптический тракт двух каналов ODS; электрическая часть состоит из платы электроники с размещёнными на ней логарифмическими усилителями оптических каналов, а также электроникой температурного канала ODS.

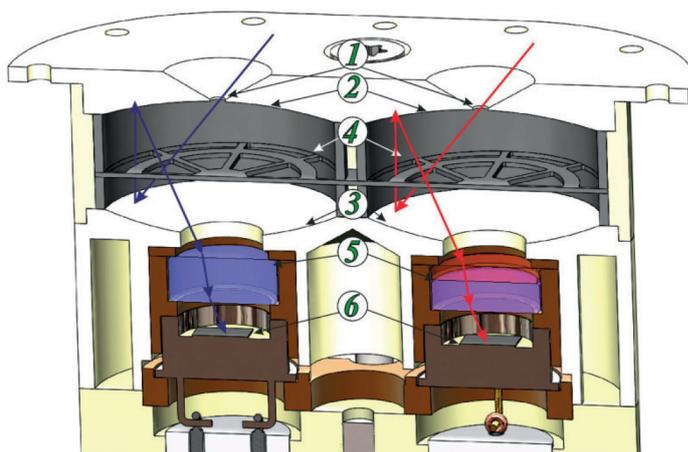
Основные характеристики прибора ODS

Габариты прибора ODS	94×92×31 мм
Масса ODS	145 г
Потребляемая мощность	100 мВт
Спектральный диапазон синего канала ODS	350–450 нм
Спектральный диапазон красного канала ODS	740–1030 нм
Поле зрения ODS (каждого оптического канала), зенитный угол	20–30°, 35–43°
Диапазон измерения температуры	–95...+85 °С
Диапазон измерения плотности светового потока S	10^{-6} – 10^2 Вт/м ²



а

б



в

Рис. 1. Прибор ODS: *а* — общий вид; *б* — модель прибора в разрезе; *в* — оптическая часть прибора в разрезе с изображением хода лучей

На *рис. 1а* показан общий вид прибора ODS. На *рис. 1б* изображена модель прибора в разрезе, благодаря чему можно увидеть внутреннюю структуру оптической, верхней, части и электрической части ODS (нижняя часть на *рис. 1б*), а на *рис. 1в* представлена в разрезе

только оптическая часть прибора ODS с нанесённым схематичным ходом лучей. Как видно из *рис. 1б, в*, прибор ODS имеет два независимых оптических канала, называемые далее условно синий и красный, которые изображены на *рис. 1в*. Оптическое излучение проходит через входную диафрагму 1, отражается от зеркал 2 и 3, при этом трижды проходит через маску прибора 4, и попадает на светофильтр 5, после чего регистрируется фотодетектором 6. Сигнал с фотодетектора поступает на логарифмический усилитель (*рис. 1б*), который преобразовывает фототок в выходное напряжение. Название оптических каналов дано в соответствии с диапазонами прозрачности светофильтров 5, подробное описание которых будет представлено ниже.

Отметим, что конструкция оптических каналов одинакова, отличие заключается лишь в типе используемого светофильтра 5 (см. *рис. 1в*). В синем канале в качестве светофильтра используется стекло СС-15 толщиной $d = 3$ мм, а в красном канале — склейка из двух стёкол ФС-6 ($d = 2$ мм) и КС-19 ($d = 1$ мм) (Каталог компании «Электростекло», http://www.elektrosteklo.ru/Elektrosteklo_Color_Glass_Spectral_Transmittance.pdf). В обоих каналах ODS используется фотодиод Hamamatsu S1336-44BK (<https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S1336-8BK.html>). Поле зрения прибора также одинаково для обоих каналов и формируется как маской 4, так и общей геометрией прибора (параметрами зеркал 2 и 3, фаской перед входной диафрагмой прибора). Ниже будут приведены результаты моделирования и измерения поля зрения прибора. Также в работе представлены результаты измерения спектров пропускания используемых светофильтров.

Научные требования к характеристикам прибора

Как было отмечено выше, прибор ODS предназначен для измерения оптической толщины атмосферы в течение дня. Характерный вид выходного сигнала, полученный в ходе верификационных измерений, представлен на *рис. 2а*. Измерения были проведены 08.06.2022 в ИКИ РАН, Москва.

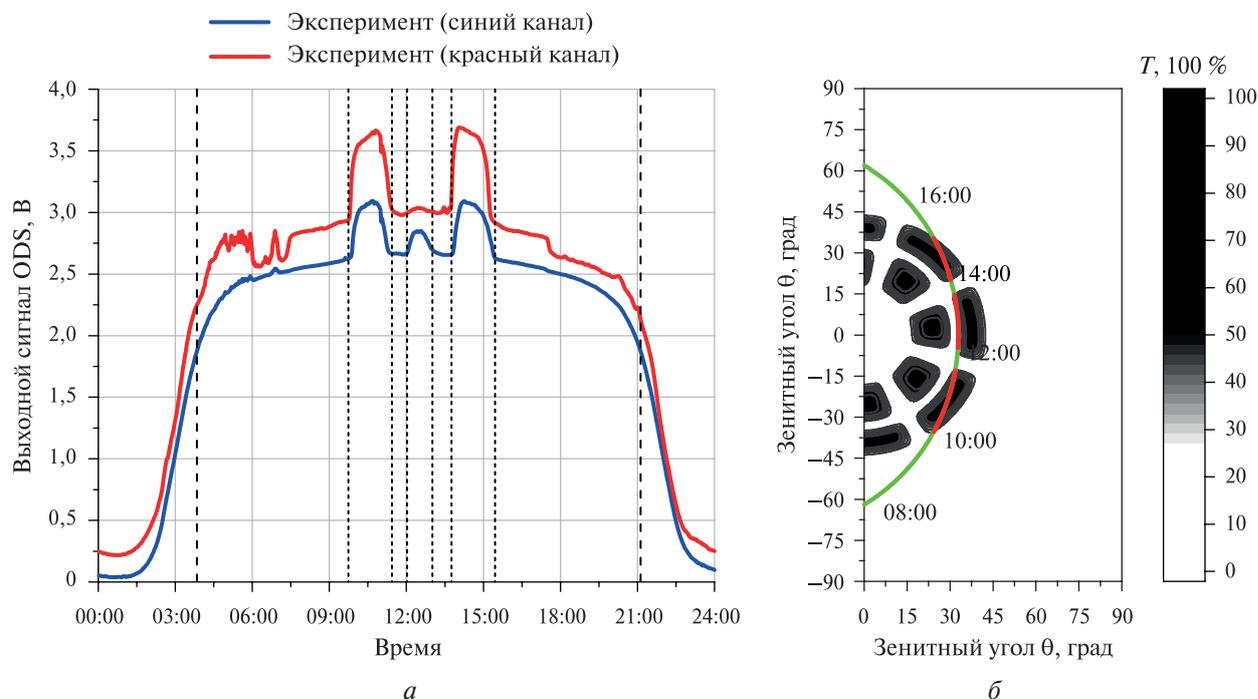


Рис. 2. Верификационные измерения в ИКИ РАН 08.06.2022: *а* — выходной сигнал прибора ODS в синем и красном каналах; *б* — поле зрения прибора ODS с наложенной траекторией движения Солнца по небесной полусфере

На *рис. 2а* вертикальными штриховыми линиями отмечено время восхода (03:50 по московскому времени) и заката (21:07) солнца, а вертикальными пунктирными линиями обозначены промежутки времени, в течение которых в поле зрения ODS попадало прямое солнце: с 09:25 до 11:25, с 12:00 до 13:00 и с 13:45 до 15:30. В этих интервалах прибор детектировал сумму прямого и рассеянного солнечного излучения, а в остальное время — только рассеянное. Эти же времена можно видеть на *рис. 2б*: интервалы, когда солнечное излучение попадает напрямую в поле зрения ODS, обозначены красным цветом, а интервалы, когда прямое солнце закрыто маской — зелёным. Из разницы уровней сигнала суммы рассеянного и прямого солнечного излучения и только рассеянного солнечного излучения можно определить среднесуточную оптическую толщину атмосферы в двух спектральных каналах. Само поле зрения прибора представлено на *рис. 2б* в виде полутоновой карты, где белому цвету соответствует минимальное пропускание, а чёрному — максимальное.

Как было сказано выше, поле зрения формируется, в том числе, маской прибора. Сложный вид маски и её форма определялись исходя из научных требований к прибору, технической реализуемости и надёжности прибора. Чем большее пропускание имеет поле зрения прибора, тем, очевидно, выше уровень сигнала. С другой стороны, увеличение пропускания маски приводит к ослаблению конструкции, что недопустимо для приборов космического применения, которые должны выдерживать большие механические, в том числе вибрационные, нагрузки. Итоговый вариант маски (см. *рис. 2б*) состоит из центрального диска, соединённого с телом маски при помощи восьми радиальных отрезков («лапок»), а также промежуточного кольца для увеличения жёсткости. Более подробно поле зрения прибора будет описано ниже.

Отдельное требование предъявляется к чувствительности оптических каналов прибора. Как было указано выше, ODS регистрирует как слабое излучение, рассеянное атмосферой, так и прямое излучение, приходящее напрямую от Солнца через атмосферу. Это создаёт требования к динамическому диапазону сигналов, с которыми должен оперировать электрический усилитель сигналов с фотодиодов. В данном приборе используется логарифмический усилитель, который позволяет регистрировать различную плотность потока S оптического излучения: от $\sim 10^{-6}$ Вт/м² (рассеянное атмосферой излучение) до $\sim 10^2$ Вт/м² (прямое солнечное излучение), при этом выходное напряжение с прибора изменяется в диапазоне 0–4 В, как видно из *рис. 2а*.

Кроме двух оптических каналов, ODS содержит также температурный канал, который используется для контроля состояния прибора, а также позволяет измерять температуру атмосферы планеты вблизи поверхности. В случае марсианской поверхности температура в течение суток может изменяться в больших пределах, приблизительно от 170 К ночью до 300 К днём, что формирует требования к температурному каналу ODS.

Результаты лабораторных измерений

В ходе лабораторных калибровок были проведены измерения поля зрения прибора, а также пропускания светофильтров в синем и красном спектральных каналах, проведены калибровки датчика температуры и логарифмических усилителей.

Моделирование и измерение поля зрения прибора

Результаты моделирования поля зрения прибора представлены на *рис. 3* (см. с. 77) и в дальнейшем будут называться расчётным полем зрения ODS. На *рис. 3а* поле зрения построено в полярных координатах (φ , θ), а на *рис. 3б* приведено сечение поля зрения в зависимости от величины зенитного угла θ для набора фиксированных азимутальных углов φ .

На *рис. 3а* зависимости приведены в виде тепловой карты, где красному цвету соответствует максимальное пропускание поля зрения (100 %), а синему — минимальное (0 %). Из конструкции самого прибора, описанной выше, следует, что поле зрения одинаково для

двух спектральных каналов ODS. Из представленных зависимостей можно видеть, что пропускание поля зрения прибора является периодически повторяющимся по азимутальному углу φ с периодом, равным 45° . На *рис. 3б* представлено сечение поля зрения ODS для малых величин азимутального угла φ , что соответствует переходной области от минимального пропускания (0°) к максимальному (21°). В ходе моделирования поля зрения установлено, что его максимальное пропускание составляет около 70 % (см. *рис. 3*). При расчёте учитывался коэффициент отражения двух алюминиевых зеркал — он считался равным 90 % независимо от длины волны. Кроме того учитывалось, что входной зрачок имеет конечную толщину, поэтому при наклонном падении света уменьшается его эффективная площадь и, как следствие, входной поток оптического излучения. Поэтому максимальная величина пропускания составляет около 70 % и достигается при зенитном угле, равном 25° (см. *рис. 3*).

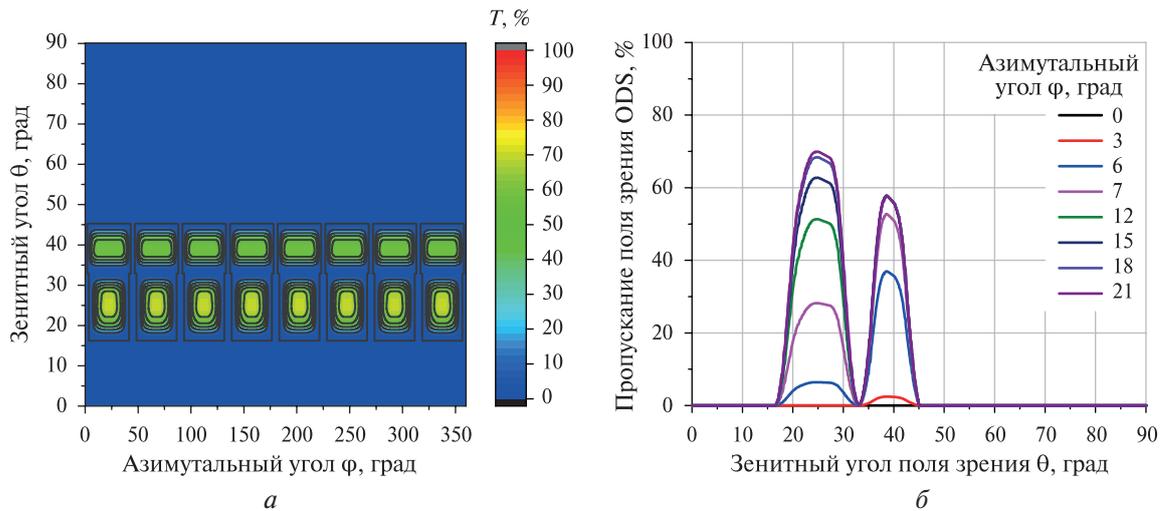


Рис. 3. Результаты моделирования поля зрения прибора ODS: *а* — поле зрения в виде тепловой карты (красный цвет — максимальное пропускание, синий — минимальное); *б* — пропускание поля зрения в зависимости от зенитного угла θ для набора углов φ в диапазоне $0\text{--}21^\circ$

Измерения поля зрения прибора проводились для двух спектральных каналов с использованием лабораторных источников излучения. Для синего канала использовался лазер He-Cd с длиной волны 441,6 нм, для красного — лампа Thorlabs SLS202/М с диапазоном длин волн 400–5500 нм (эквивалентная цветовая температура 1900 К). Излучение от каждого источника попадало в соответствующий оптический вход прибора ODS, который был установлен на поворотной платформе, используемой для наклона прибора в вертикальной и горизонтальной плоскости.

Измерения поля зрения ODS проводились в синем и красном канале с учётом его симметрии в диапазоне углов φ и θ : $0\text{--}45^\circ$ и $0\text{--}65^\circ$ соответственно. Важно отметить, что использованная методика измерений позволяла определить в эксперименте лишь относительное изменение пропускания поля зрения прибора ODS, абсолютная величина пропускания не определялась. Результаты измерений поля зрения для синего канала представлены на *рис. 4* (см. с. 78), а для красного канала — на *рис. 5* (см. с. 78). На *рис. 4а* и *5а* представлено измеренное поле зрения, а на *рис. 4б* и *5б* — расчётное поле зрения прибора в диапазоне $0\text{--}45^\circ$ угла φ и $0\text{--}90^\circ$ угла θ .

Из полученных зависимостей видно, что в синем канале ODS расчётное и экспериментально измеренное поле зрения качественно совпадают. Однако имеются различия в переходных областях: в эксперименте пропускание меняется более плавно и в большем угловом диапазоне по сравнению с расчётом (см. *рис. 4*). Аналогичные различия в переходных областях наблюдаются и для пропускания красного канала ODS (см. *рис. 5*). Также в красном канале поле зрения повернуто на небольшую величину азимутального угла $\varphi = 2^\circ$ относительно расчётного, что можно видеть на *рис. 5а* по отличному от нуля пропусканию при $\varphi = 0^\circ$ и $\theta = 23^\circ$.

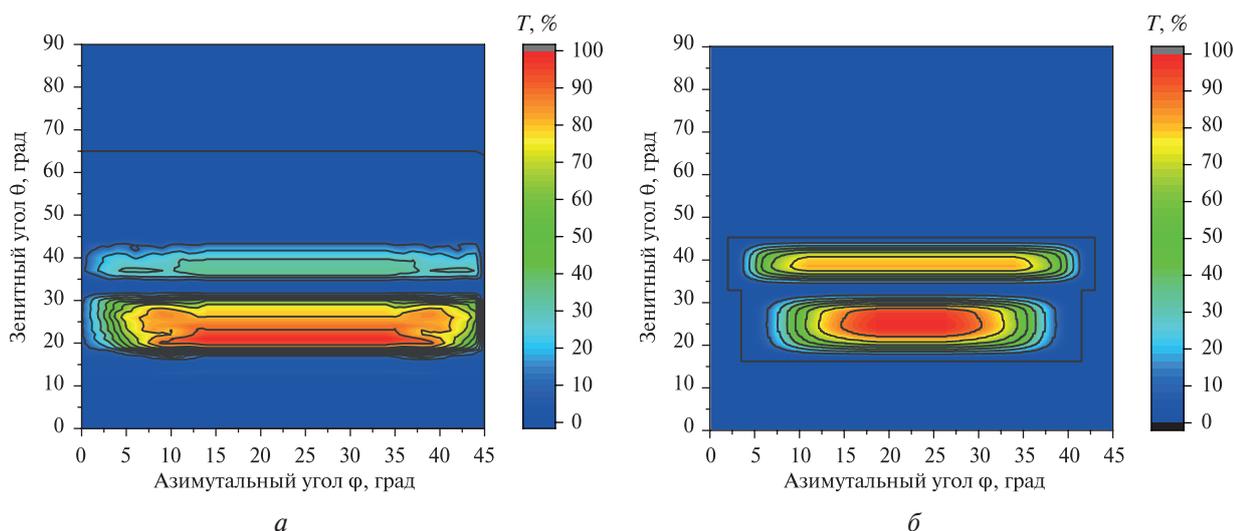


Рис. 4. Результаты измерения поля зрения прибора ODS в синем канале: *a* — измеренное поле зрения в виде тепловой карты (красный цвет — максимальное пропускание, синий — минимальное); *б* — расчётное поле зрения для синего канала

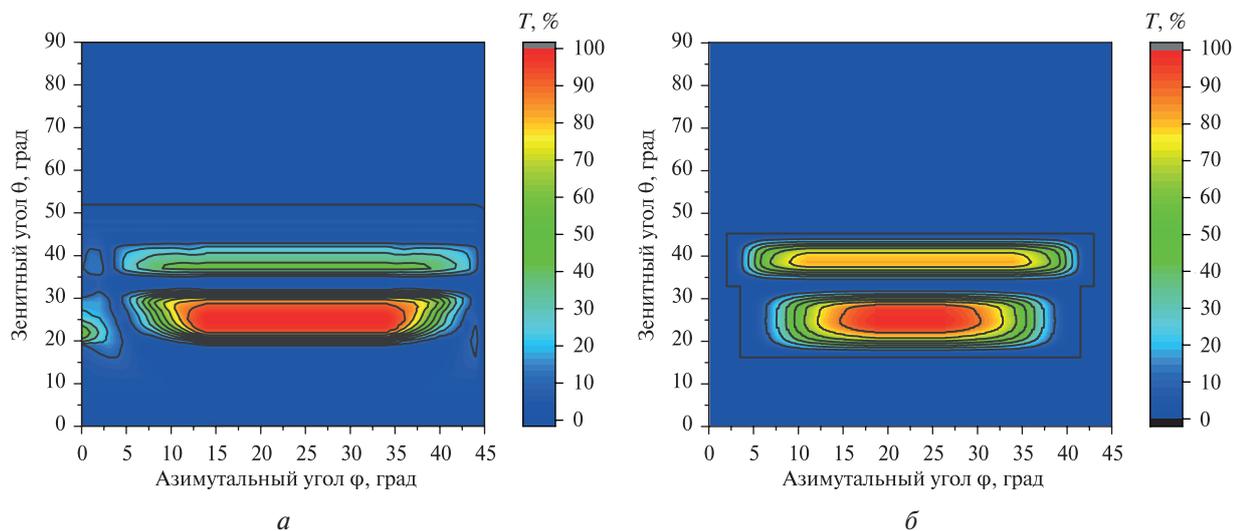


Рис. 5. Результаты измерения поля зрения прибора ODS в красном канале: *a* — измеренное поле зрения в виде тепловой карты (красный цвет — максимальное пропускание, синий — минимальное); *б* — расчётное поле зрения для красного канала

Более общее и фундаментальное различие между расчётным и экспериментальным полем зрения было получено для зенитных углов в диапазоне $45\text{--}63^\circ$ угла θ для всех значений азимутальных углов φ . Расчётное пропускание для зенитных углов свыше $\theta = 45^\circ$ равно нулю (см. рис. 3). Но при экспериментальном исследовании была обнаружена малая величина пропускания, $1,5\text{--}2\%$, в диапазоне зенитных углов $45\text{--}63^\circ$. Данная величина пропускания наблюдалась как в синем, так и в красном канале ODS. Анализ показал, что «утечка» связана с неидеальностью чернения внутренних боковых стенок, а также самой маски прибора ODS (см. рис. 1). Излучение, попадая на внутреннюю стенку прибора или на поверхность маски, рассеивается и создаёт паразитную засветку, что также наблюдалось и в ходе верификационных полевых измерений (см. рис. 2а). Данная паразитная засветка проявлялась в виде пьедестала в красном канале при достаточно большой высоте солнца над горизонтом: с 07:30 до 17:30 для измерения 08.06.2022 (см. рис. 2а) (Хоркин и др., 2023). В случае полевых измерений паразитный сигнал имел место только в красном канале, так как в синем канале, во-

первых, меньше интегральный световой поток на входе прибора, а во-вторых, по-видимому, покрытие внутренних стенок лучше поглощает свет в этом диапазоне. Но использование мощного лабораторного источника позволило обнаружить указанный эффект и в синем канале, аналогично красному.

Измерение пропускания светофильтров

Как было отмечено выше, конструкция спектральных каналов ODS одинакова, за исключением светофильтров: в синем канале установлено стекло СС-15 толщиной $d = 3$ мм, а в красном — склейка из двух стёкол ФС-6 ($d = 2$ мм) и КС-19 ($d = 1$ мм) (Каталог компании «Электростекло» (http://www.elektrosteklo.ru/Elektrosteklo_Color_Glass_Spectral_Transmittance.pdf)). В качестве детекторов оптического излучения в обоих каналах использованы фотодиоды Hamamatsu S1336-44BK. На *рис. 6а* приведены спектральные характеристики используемых светофильтров и фотодиода, а на *рис. 6б* — итоговая чувствительность каждого из каналов ODS. Сплошные линии на *рис. 6а* соответствуют литературным данным о прозрачности светофильтров, а штриховые линии — полученным экспериментальным данным. Синим цветом представлены параметры светофильтра синего канала ODS, красным — красного канала. Изучение спектральной чувствительности фотодетектора экспериментально не проводилось, поэтому на *рис. 6а* зелёным цветом представлена теоретическая зависимость (<https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S1336-8BK.html>).

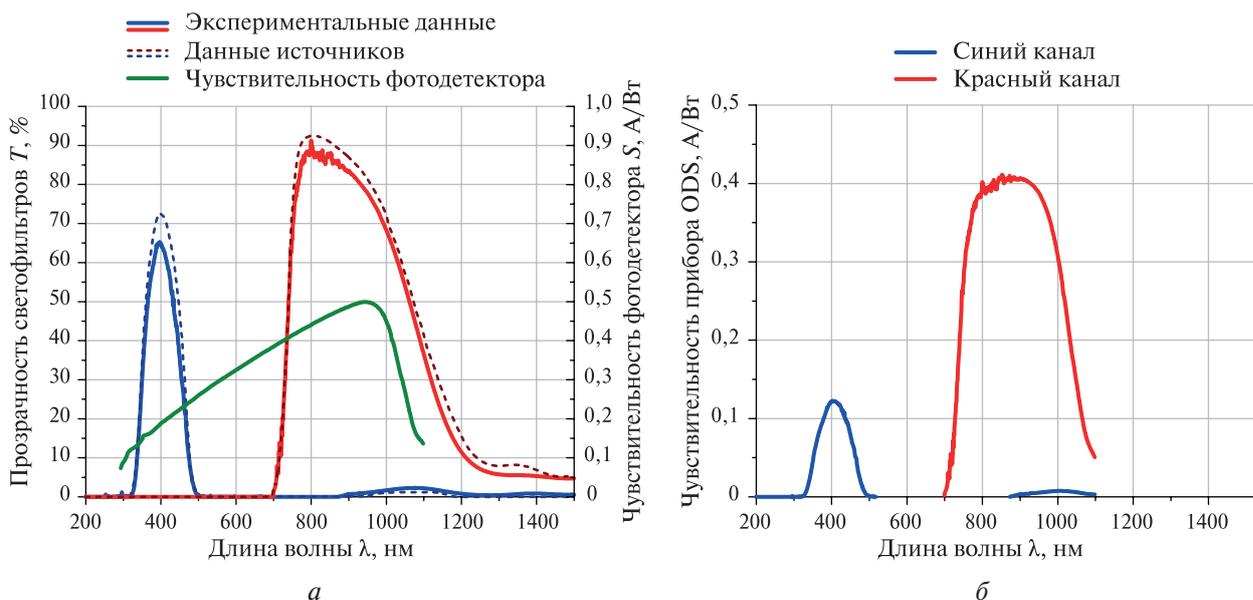


Рис. 6. Спектральные характеристики светофильтров и фотодетектора прибора ODS (*а*), итоговая спектральная чувствительность красного и синего каналов (*б*)

Представленные на *рис. 6а* измерения проводились при помощи спектрометра Ocean Optics HR4000 (рабочий диапазон длин волн 250–700 нм), который использовался для измерений светофильтра синего канала ODS. Для измерения светофильтра красного канала ODS использовался спектрометр Yokogawa A06370C (рабочий диапазон длин волн 600–1500 нм). На *рис. 6а* видно хорошее совпадение между экспериментальными и теоретическими зависимостями пропускания светофильтров, отличия не превышают 10 % по абсолютной величине пропускания. Также на *рис. 6а* показана спектральная чувствительность фотодиода Hamamatsu S1336-44BK, максимальная чувствительность которого достигается на длине волны 950 нм. Из зависимостей на *рис. 6* следует, что спектральный диапазон синего канала ODS определяется пропусканием светофильтра на основе стекла СС-15, а диапазон красного

канала — как пропусканием светофильтра (стёкла КС-19 и ФС-6), так и чувствительностью детектора.

Таким образом, итоговая спектральная чувствительность каждого канала ODS (см. рис. 6б) становится произведением пропускания светофильтра и чувствительности фотодетектора. Из полученных зависимостей видно, что синий канал ODS чувствителен к излучению в диапазоне длин волн 350–450 нм, а красный канал — в диапазоне 740–1030 нм. На рис. 6б также видно, что синий канал имеет ненулевую чувствительность в диапазоне длин волн 900–1100 нм, что соответствует длинноволновой части красного канала. Величина чувствительности синего канала ODS на указанных длинах волн не превышает 0,008 А/Вт, в то время как максимальная чувствительность достигает 0,120 А/Вт на длине волны 405 нм. Из приведённых величин следует, что паразитная чувствительность синего канала в диапазоне длин волн 900–1100 нм примерно в 15 раз меньше, чем чувствительность в основной части. Поэтому при анализе результатов, полученных синим каналом прибора ODS, диапазоном длин волн более 500 нм можно пренебречь.

Калибровочные измерения датчика температуры ODS

Как было сказано выше, в состав ODS входит термодатчик, размещённый на плате в электрической части прибора. Чувствительным элементом служит платиновый терморезистор, сопротивление которого зависит от температуры. Для калибровки температурного канала ODS был помещён на термостабилизированную плиту термовакуумной камеры. В ходе измерений на поверхности прибора были закреплены платиновые термодатчики, по данным с которых и проводилась калибровка температурного канала ODS. Измерения проводились в диапазоне температуры $-40...+40$ °С. Результаты калибровки представлены на рис. 7. Два вспомогательных датчика температуры были размещены на корпусе ODS (красная и синяя кривые), один датчик — вблизи оптических входов ODS (фиолетовая кривая), и ещё один на термостабилизированной плите камеры (чёрная кривая). Температура термодатчика ODS показана зелёными точками на рис. 7.

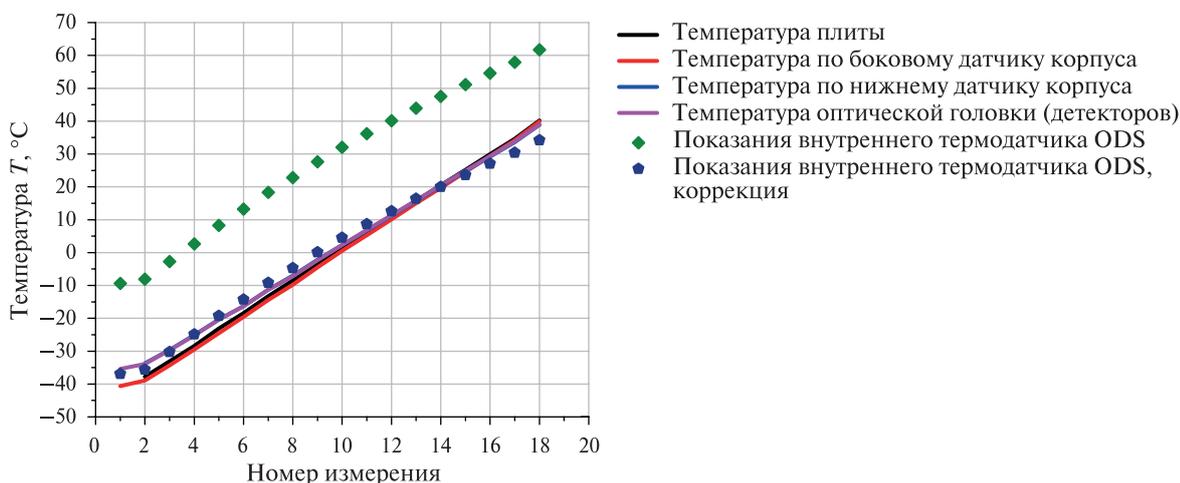


Рис. 7. Результаты калибровочных измерений температурного канала прибора ODS

Из представленных на рис. 7 результатов следует, что температура, измеряемая термодатчиком ODS, отличается на приблизительно постоянную величину $\Delta T = +27$ °С во всём измеренном диапазоне температуры. Из этого следует, что температура платы, на которой расположен термодатчик, превышает температуру корпуса прибора на эту величину. На рис. 7 синими точками приведены результаты, полученные термодатчиком ODS с учётом коррекции на определённую в ходе калибровки величину ΔT .

Температурные калибровки логарифмических усилителей

Как было отмечено выше, сигналы с фотодетекторов поступают на логарифмические усилители, необходимость которых диктуется очень большим динамическим диапазоном входного оптического сигнала (см. с. 74). Известно, что коэффициент усиления такого рода усилителей определяется полупроводниковыми элементами, сопротивление которых сильно зависит от температуры (Хоровиц, Хилл, 2014). В приборе ODS используется схема усилителя, компенсирующая влияние температуры на параметры её элементов. Для проверки параметров усилителя были проведены лабораторные измерения выходного сигнала логарифмических усилителей в зависимости от температуры и величины фототока на входе усилителей. Эти измерения позволили установить зависимость, связывающую величину сигнала на входе усилителя (фототок I) с величиной сигнала на выходе усилителя (напряжение V) в зависимости от температуры T .

Для проведения описанных выше измерений оптическая и электрическая части прибора были разделены: вместо тока с фотодетектора на вход логарифмических усилителей подавался ток, который формировался лабораторным источником напряжения (0–30 В), подключённым к известному сопротивлению (100 и 10 МОм). Тем самым были сымитированы сигналы с оптического блока ODS (с фотодетекторов) при I в диапазоне 1–3000 нА. Измерения проводились в термовакуумной камере в интервале температуры $-40\dots+40$ °С. Результаты измерений приведены на *рис. 8* в виде зависимости выходного сигнала ODS V от входного тока I в логарифмическом масштабе, зависимость от температуры представлена цветом точек при помощи тепловой палитры от синего (-40 °С) цвета до красного ($+40$ °С).

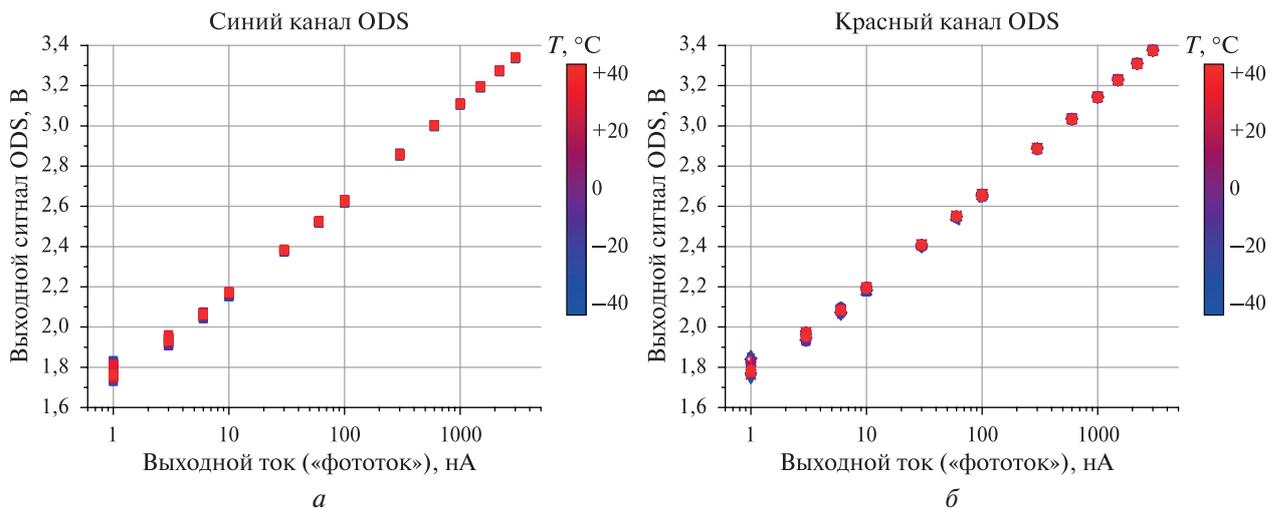


Рис. 8. Результаты калибровочных измерений логарифмических усилителей прибора ODS: *a* — усилитель синего канала; *b* — усилитель красного канала

Из представленных на *рис. 8* зависимостей видно, что выходное напряжение с логарифмических усилителей двух спектральных каналов ODS слабо зависит от температуры. Наибольшее влияние температуры проявляется на малых величинах входного тока (фототока) $I \leq 10$ нА, что соответствует выходному напряжению $V < 2$ В. Такой уровень выходного сигнала с фотодиодов наблюдается в полевых измерениях вблизи времени восхода и заката солнца (см. *рис. 2*). При напряжениях выходного сигнала ODS больше 2,2 В, что соответствует большей части светового дня, этот сигнал слабо зависит от внешней температуры (см. *рис. 8*). Полученные данные позволили установить коэффициент усиления логарифмических усилителей ($V_{\text{Blue}}, V_{\text{Red}}$ — в В; T — в °С; I — в нА):

$$\begin{aligned} V_{\text{Blue}} &= (0,475 - 0,00016 \cdot T) \lg(I) + (1,675 + 0,00051T), \\ V_{\text{Red}} &= (0,480 - 0,00017T) \lg(I) + (1,695 + 0,00050T). \end{aligned} \quad (1)$$

Полученные в результате лабораторных калибровок выражения (1) описывают характеристики логарифмических усилителей синего (V_{Blue}) и красного (V_{Red}) каналов ODS. Из полученных выражений и данных на *рис. 8* видно, что спектральные каналы ODS обладают схожими характеристиками логарифмических усилителей, которые слабо зависят от температуры T . Поэтому для простоты расчётов можно использовать приведённые ниже соотношения, которые получены при условии $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$V_{\text{Blue}} = 0,469 \lg(I) + 1,695, \quad V_{\text{Red}} = 0,473 \lg(I) + 1,715.$$

Полученные выражения для характеристик усилителей ODS используются при моделировании выходного сигнала (Хоркин и др., 2023).

Заключение

Приведено описание технических характеристик и устройства прибора ODS. Прибор является малогабаритным и лёгким, он предназначен для измерения среднесуточной оптической толщины атмосферы планеты. Настоящая версия прибора была адаптирована для миссии «ЭкзоМарс-2022» (входила в состав комплекса научной аппаратуры посадочной платформы). Подробно описаны конструкция и характеристики прибора, приведены результаты лабораторных измерений его поля зрения и спектральных характеристик, а также результаты температурных калибровок. Полученные результаты демонстрируют хорошее совпадение между расчётными и измеренными характеристиками прибора. Прибор ODS в дальнейшем может быть включён в состав будущих проектов исследования Марса. Также ODS может быть использован для наблюдения за атмосферой Земли. В настоящий момент на территории России отсутствует централизованная сеть солнечных фотометров, которые проводили бы автоматическое наблюдение за состоянием атмосферы. Имеющийся прибор ODS можно адаптировать для длительного автоматического наблюдения за состоянием земной атмосферы. После проведения дополнительных исследований и калибровочных измерений новый прибор, сохранивший принципы работы ODS, может быть полезен для наблюдения за параметрами земного аэрозоля вместе с уже работающими фотометрами на территории России.

Литература

1. Хоркин В. С., Федорова А. А., Доброленский Ю. С. и др. Прибор ODS миссии «ЭкзоМарс-2022»: моделирование и наземные полевые измерения // *Астрон. вестн.: Исслед. Солнечной системы*. 2023. Т. 57. № 4. С. 307–318. DOI: 10.31857/S0320930X23040059.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. 7-е изд. М.: Бином, 2014. 706 с.
3. Cantor B. A. MOC observations of the 2001 Mars planet-encircling dust storm // *Icarus*. 2007. V. 186. P. 60–96. DOI: 10.1016/j.icarus.2006.08.019.
4. Fedorova A. A., Rodin A. V., Baklanova I. V. Seasonal cycle of water vapor in the atmosphere of Mars as revealed from the MAWD/Viking 1 and 2 experiment // *Solar System Research*. 2004. V. 38. P. 421–433. Iss. 6. DOI: 10.1007/s11208-005-0009-2.
5. Guzewich S. D., Lemmon M., Smith C. L. et al. Mars science laboratory observations of the 2018/ Mars year 34 global dust storm // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. Iss. 1. P. 71–79. DOI: 10.1029/2018GL080839.
6. Haberle R., Clancy R., Forget F. et al. The atmosphere and climate of Mars. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. DOI: 10.1017/9781139060172.
7. Harri A.-M., Linkin V., Polkko J. et al. Meteorological observations on Martian surface: met-packages of Mars-96 small stations and penetrators // *Planetary and Space Science*. 1998. V. 46. Iss. 6–7. P. 779–793. DOI: 10.1016/S0032-0633(98)00012-9.
8. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I. et al. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sensing of Environment*. 1998. V. 66. Iss. 1. P. 1–16. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5.
9. Linkin V., Harri A.-M., Lipatov A. et al. A sophisticated lander for scientific exploration of Mars: scientific objectives and implementation of the Mars-96 small station // *Planetary and Space Science*. 1998. V. 46. P. 717–737. DOI: 10.1016/S0032-0633(98)00008-7.

10. Lorenz R. D., Martínez G. M., Spiga A. et al. Lander and rover histories of dust accumulation on and removal from solar arrays on Mars // *Planetary and Space Science*. 2021. V. 207. Article 105337. 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105337>.
11. Montmessin F., Rannou P., Cabane M. New insights into Martian dust distribution and water-ice cloud microphysics // *J. Geophysical Research: Planets*. 2002. V. 107. Iss. E6. P. 4.1–4.14. DOI: 10.1029/2001JE001520.
12. Toledo D. Preparation and validation of the cloud and dust opacity sensor ODS for ExoMars 2018 mission: PhD thesis in Astrophysics. Univ. Reims Champagne, 2015. 182 p.
13. Toledo D., Rannou P., Pommereau J.-P., Foujols T. (2016a) The optical depth sensor (ODS) for column dust opacity measurements and cloud detection on martian atmosphere // *Experimental Astronomy*. 2016. V. 42. P. 61–83. DOI: 10.1007/s10686-016-9500-7.
14. Toledo D., Rannou P., Pommereau J.-P. et al. (2016b) Measurement of aerosol optical depth and sub-visual cloud detection using the optical depth sensor (ODS) // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2016. V. 9. P. 455–467. DOI: 10.5194/amt-9-455-2016.
15. Tran T. T., Pommereau J.-P., Rannou P., Maria J.-L. Technical aspect of the optical depth sensor // *Advances in Space Research*. 2005. V. 36. P. 2182–2186. DOI: 10.1016/j.asr.2005.07.079.
16. Vincendon M., Audouard J., Altieri F., Ody A. Mars Express measurements of surface albedo changes over 2004–2010 // *Icarus*. 2015. V. 251. P. 145–163. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.10.029.
17. Wolff M. J., Clancy R. T., Kahre M. A. et al. Mapping water ice clouds on Mars with MRO/MARCI // *Icarus*. 2019. V. 332. P. 24–49. DOI: 10.1016/j.icarus.2019.05.041.
18. Wolff M. J., Fernando A., Smith M. D. et al. Diurnal variations in the aphelion cloud belt as observed by the Emirates Exploration Imager (EXI) // *Geophysical Research Letters*. 2022. V. 49. Iss. 18. Article e2022GL100477. DOI: 10.1029/2022GL100477.
19. Zelenyi L. M., Korablev O. I., Rodionov D. S. et al. Scientific objectives of the scientific equipment of the landing platform of the ExoMars-2018 mission // *Solar System Research*. 2015. V. 49. Iss 7. P. 509–517. DOI: 10.1134/S0038094615070229.

ODS instrument of ExoMars-2022 project: Structure, main characteristics and results of laboratory calibrations

V. S. Khorkin^{1,4}, Yu. S. Dobrolenskiy¹, O. I. Korablev¹, N. A. Vyazovetskiy¹,
I. A. Dzyuban¹, A. Yu. Titov¹, A. A. Fedorova¹, A. G. Sapgir¹, D. Toledo²,
J.-P. Pommereau³, P. Rannou²

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: vs_khorkin@mail.ru

² *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Madrid 28850, Spain*

³ *LATMOS, l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines*
Guyancourt 78280, France

⁴ *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

The paper presents the ODS (Optical Depth Sensor) instrument developed at the Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences for the ExoMars-2022 project. Designed for long-term operation on the surface of Mars, ODS shall provide daily measurements of optical thickness of dust and condensation aerosol in the planet's atmosphere from the illumination of its surface. To participate in the ExoMars-2022 project, the ODS instrument was upgraded and underwent a full cycle of ground testing. The paper describes the instrument design, its optical scheme and the spectral characteristics of two optical channels. The paper also considers the parameters of the temperature sensor incorporated in the instrument. The results of laboratory calibrations of the device parameters such as field of view, spectral characteristics and calibration of the ODS temperature sensor are given. In the experiment it is found that the instrument has spectral transmittance in the range of 350–450 and 740–1030 nm, the field of view of the instrument is from 18 to 33° and from 35 to 45° in zenith angle. The instrument has been tested in the temperature range –40 to +40 °C.

Keywords: ExoMars-2022, atmosphere optical depth, field of view, calibrations

Accepted: 08.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-72-84

References

1. Khorkin V. S., Fedorova A. A., Dobrolenskiy Yu. S. et al., ExoMars-2022 mission ODS instrument: Modeling and ground field measurements, *Solar System Research*, Vol. 57, pp. 324–335, DOI: 10.1134/S0038094623040056.
2. Horowitz P., Hill W., *The art of electronics*, 2nd ed., Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1192 p.
3. Cantor B. A., MOC observations of the 2001 Mars planet-encircling dust storm, *Icarus*, 2007, Vol. 186, pp. 60–96, DOI: 10.1016/j.icarus.2006.08.019.
4. Fedorova A. A., Rodin A. V., Baklanova I. V., Seasonal cycle of water vapor in the atmosphere of Mars as revealed from the MAWD/Viking 1 and 2 experiment, *Solar System Research*, 2004, Vol. 38, Issue 6, pp. 421–433, DOI: 10.1007/s11208-005-0009-2.
5. Guzewich S. D., Lemmon M., Smith C. L. et al., Mars Science Laboratory observations of the 2018/Mars year 34 global dust storm, *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46, Issue 1, pp. 71–79, DOI: 10.1029/2018GL080839.
6. Haberle R., Clancy R., Forget F. et al., *The Atmosphere and Climate of Mars*, Cambridge: Cambridge University Press, 2017, DOI: 10.1017/9781139060172.
7. Harri A.-M., Linkin V., Polkko J. et al., Meteorological observations on Martian surface: met-packages of Mars-96 small stations and penetrators, *Planetary and Space Science*, 1998, Vol. 46, Issues 6–7, pp. 779–793, DOI: 10.1016/S0032-0633(98)00012-9.
8. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I. et al., AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 1998, Vol. 66, Issue 1, pp. 1–16, DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5.
9. Linkin V., Harri A.-M., Lipatov A. et al., A sophisticated lander for scientific exploration of Mars: scientific objectives and implementation of the Mars-96 small station, *Planetary and Space Science*, 1998, Vol. 46, pp. 717–737, DOI: 10.1016/S0032-0633(98)00008-7.
10. Lorenz R. D., Martínez G. M., Spiga A. et al., Lander and rover histories of dust accumulation on and removal from solar arrays on Mars, *Planetary and Space Science*, 2021, Vol. 207, Article 105337, 12 p., <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105337>.
11. Montmessin F., Rannou P., Cabane M., New insights into Martian dust distribution and water-ice cloud microphysics, *J. Geophysical Research: Planets*, 2002, Vol. 107, Issue E6, pp. 4.1–4.14, DOI: 10.1029/2001JE001520.
12. Toledo D., *Preparation and validation of the cloud and dust opacity sensor ODS for ExoMars 2018 mission*, PhD thesis in Astrophysics, Univ. Reims Champagne, 2015, 182 p.
13. Toledo D., Rannou P., Pommereau J.-P., Foujols T. (2016a), The optical depth sensor (ODS) for column dust opacity measurements and cloud detection on Martian atmosphere, *Experimental Astronomy*, 2016, Vol. 42, pp. 61–83, DOI: 10.1007/s10686-016-9500-7.
14. Toledo D., Rannou P., Pommereau J.-P. et al. (2016b), Measurement of aerosol optical depth and sub-visual cloud detection using the optical depth sensor (ODS), *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, Vol. 9, pp. 455–467, DOI: 10.5194/amt-9-455-2016.
15. Tran T. T., Pommereau J.-P., Rannou P., Maria J.-L., Technical aspect of the optical depth sensor, *Advances in Space Research*, 2005, Vol. 36, pp. 2182–2186, DOI: 10.1016/j.asr.2005.07.079.
16. Vincendon M., Audouard J., Altieri F., Ody A., Mars Express measurements of surface albedo changes over 2004–2010, *Icarus*, 2015, Vol. 251, pp. 145–163, DOI: 10.1016/j.icarus.2014.10.029.
17. Wolff M. J., Clancy R. T., Kahre M. A. et al., Mapping water ice clouds on Mars with MRO/MARCI, *Icarus*, 2019, Vol. 332, pp. 24–49, DOI: 10.1016/j.icarus.2019.05.041.
18. Wolff M. J., Fernando A., Smith M. D. et al., Diurnal variations in the aphelion cloud belt as observed by the Emirates Exploration Imager (EXI), *Geophysical Research Letters*, 2022, Vol. 49, Issue 18, Article e2022GL100477, DOI: 10.1029/2022GL100477.
19. Zelenyi L. M., Korablev O. I., Rodionov D. S. et al., Scientific objectives of the scientific equipment of the landing platform of the ExoMars-2018 mission, *Solar System Research*, 2015, Vol. 49, Issue 7, pp. 509–517, DOI: 10.1134/S0038094615070229.