

УДК 523.43,520.3,535.36

ПРИБОР ODS МИССИИ ЭКЗОМАРС-2022: МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАЗЕМНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

© 2023 г. В. С. Хоркин^{a, b, *}, А. А. Федорова^a, Ю. С. Доброленский^a, О. И. Кораблев^a, Н. А. Вязоветский^a, И. А. Дзюбан^a, А. Г. Сапгир^a, А. Ю. Титов^a, Д. Толедо^c, Ж.-П. Помро^d, П. Ранну^c

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

^cInstituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Madrid, Spain

^dLATMOS, Université de Versailles-St-Quentin, Guyancourt, France

*e-mail: vs_khorkin@mail.ru

Поступила в редакцию 29.12.2022 г.

После доработки 01.03.2023 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

В работе представлены результаты моделирования и наземных полевых измерений прибора ODS (ODS – Optical Depth Sensor), предназначенного для исследования аэрозоля в марсианской атмосфере посредством ежедневных измерений освещенности на поверхности планеты. Прибор являлся частью метеокомплекса, размещенного на посадочной платформе миссии ЭкзоМарс-2022. В статье приведены устройство прибора, его оптическая схема и спектральные характеристики двух каналов. Описаны основные элементы модели для расчета потока излучения, измеряемого прибором, в зависимости от структуры атмосферы, взвешенного в ней аэрозоля и суточного движения Солнца. Расчеты проводились в приближении псевдосферической атмосферы с учетом многократного рассеяния излучения. С использованием созданной модели, адаптированной для земной атмосферы, проведено моделирование сигнала прибора ODS для двух серий наземных полевых измерений на разных широтах. Измеренные суточные зависимости в сравнении с результатами моделирования позволяют определить оптическую толщину с точностью 0.1.

Ключевые слова: ЭкзоМарс-2022, оптическая толщина, атмосфера Марса, оптический аэрозоль, SHDOM

DOI: 10.31857/S0320930X23040059, **EDN:** REFZHQ

ВВЕДЕНИЕ

Пылевые аэрозоли являются одним из важных факторов энергетического баланса атмосферы и климата Марса. Взвешенная в атмосфере пыль эффективно поглощает и рассеивает солнечное излучение, что приводит к перераспределению энергии и нагреву самой атмосферы. Правильный учет распределения пылевого аэрозоля в пространстве и времени необходим при моделировании атмосферного переноса в моделях общей циркуляции атмосферы Марса (Haberle и др., 2017).

Пылевой цикл на Марсе тесно связан с циклами CO₂ и воды. Осаждаемая на поверхность пыль меняет коэффициент отражения льда CO₂, влияя на радиационный баланс в полярных областях и скорость конденсации и сублимации CO₂ (Haberle и др., 2017). Пылевые частицы служат ядрами конденсации при образовании облаков водяного льда (Montmessin и др., 2002). Образование обла-

ков перераспределяет содержание воды в атмосфере и также изменяет радиационный баланс. В свою очередь, ледяные частицы, образовавшиеся на пылевом аэрозоле, способствуют ускоренному осаждению пыли, что влияет на ее вертикальное распределение в атмосфере.

Количественные оценки содержания пыли в атмосфере необходимы для восстановления содержания малых газовых составляющих в ИК-области спектра (Fedorova и др., 2004), а также для правильной интерпретации спектров отражения поверхности (Vincendon и др., 2015). Знание сезонных вариаций количества пыли в атмосфере Марса позволяет определить времена года, когда пыль эффективно поднимается с поверхности планеты, в том числе с “пылевым дьяволом” (вихрь, поднимающий пыль с поверхности планеты и являющийся одним из механизмов, которые могут способствовать очистке поверхностей солнечных панелей и научной аппаратуры поса-

дочных модулей и марсоходов (Haberle и др., 2017; Lorenz и др., 2021)).

Наблюдения показывают, что пыль присутствует в атмосфере Марса круглый год, однако ее количество изменяется в зависимости от сезона. Используя соглашение о нумерации марсианского времени (Clancy и др., 2000), на Марсе можно выделить спокойный сезон ($L_s \sim 0^\circ - 135^\circ$) с низким содержанием пыли в атмосфере и сезон пыли ($L_s \sim 135^\circ - 360^\circ$), в течение которого содержание пыли в атмосфере существенно выше и могут наблюдаться пылевые бури (Haberle и др., 2017). В спокойный сезон оптическая толщина атмосферы в видимом диапазоне спектра варьируется в пределах $\tau = 0.1 - 1.0$. В случае же пылевых бурь на Марсе оптическая толщина может достигать значения $\tau = 5$. Оптическая толщина атмосферы Марса в сезон пыли измерялась разными научными миссиями, одними из первых была орбитальная станция Mariner-9 (Martin, 1974), а также орбитальные и посадочные станции Viking-1 и Viking-2. Были получены величины оптической толщины атмосферы в течение нескольких марсианских лет (Zurek, 1982). Позже наблюдение за пылью в атмосфере Марса проводилось при помощи орбитальных аппаратов MGS (Mars Global Surveyor), Mars Odyssey, Mars Express, MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) и ExoMars Trace Gas Orbiter (Cantor, 2007; Smith, 2009; Kleinboehl и др., 2020). Полученные данные позволили построить карты оптической толщины в зависимости от сезона (Montabone и др., 2015; 2020). Измерения оптической толщины пыли также проводились и на спускаемых аппаратах/марсоходах, например, Mars Pathfinder (Markiewicz и др., 1999; 2002) или Curiosity (Lemmon и др., 2015; Guzewich и др., 2019). В частности, панорамные камеры, установленные на марсоходах Mars Pathfinder, Spirit, Opportunity позволяли проводить измерения оптической толщины атмосферы, размеров частиц, а также распределения аэрозоля с высотой (Markiewicz и др., 1999; 2002; Lemmon и др., 2015). Работа таких камер была основана на измерении яркости неба при различных зенитных углах наблюдения с применением спектральных светофильтров (Smith и др., 1997). Таким образом, из приведенного краткого анализа видно, что непрерывный мониторинг оптической толщины атмосферы, а также определение оптических параметров частиц, в частности, распределение частиц по размерам, является актуальной и важной задачей. Однако на данный момент большинство наблюдений ведутся дистанционно, что создает сложности при привязке глобальных данных и сравнении измерений с разными научными приборами. Поэтому для измерения параметров оптической толщины пыли с поверхности Марса был предложен прибор ODS, находящийся на посадочной платформе миссии ЭкзоМарс-2022.

В статье представлены основные характеристики прибора ODS, который предназначен для определения среднесуточной оптической толщины атмосферы по данным измерений освещенности у поверхности планеты. Рассматриваемый прибор являлся частью комплекса научной аппаратуры посадочной платформы миссии ЭкзоМарс-2022 (Zelenyi и др., 2015). Прибор ODS требует очень незначительных ресурсов, массы, объема, энергопотребления (Tran и др., 2005; Maria и др., 2006; Toledo и др., 2016b).

Прибор на этом принципе был впервые разработан во Франции в конце 1980-х гг. для малых станций и установлен на аппарате Марс-96, запуск которого закончился неудачей (Linkin и др., 1998; Nagi и др., 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 под определенными углами, свет через волновод попадал на светофильтры и фотодетекторы (Nagi и др., 1998). Таким образом, в течение суток ODS измерял либо рассеянное атмосферой солнечное излучение, либо сумму рассеянного и прямого излучения, что позволяло определять оптическую толщину атмосферы. Наличие двух каналов с разными светофильтрами давало возможность получить значение оптической толщины на разных длинах волн, а также параметры аэрозоля, взвешенного в атмосфере. Эта концепция, включающая в себя использование двух спектральных диапазонов и сформированного поля зрения, сохранилась во всех последующих приборах. В дальнейшем, прибор предлагался для установки на посадочные аппараты марсианских метеосетей (NASA PASCAL, Mars meteorological network, CNES NETLANDER), однако по разным причинам эти проекты не были реализованы. Еще один прибор SIS (Solar Irradiance Sensor) для измерения оптической толщины был установлен на посадочной платформе Schiaparelli миссии ЭкзоМарс-2016 (аппарат потерпел неудачу при посадке). Он имел иное конструктивное исполнение по сравнению с описанным в настоящей работе прибором ODS — на сторонах треугольной пирамиды располагались три фотодетектора, которые измеряли освещенность в течение суток (Toledo и др., 2017). В любой момент времени только два из трех фотодетекторов могли наблюдать прямое солнечное излучение, оставшийся детектор регистрировал рассеянное излучение. В результате прибор позволял определять оптическую толщину атмосферы и основные параметры аэрозоля, взвешенного в ней (Toledo и др., 2017). Несмотря на неудачи с марсианскими аппаратами, эксперимент ODS был успешно испытан при наблюдении за параметрами земной атмосферы (Toledo, 2015; Toledo и др., 2016b). В частности, проведены две успешные кампании

по измерению оптических свойств атмосферы в Буркина-Фасо (Уагадугу) в 2004–2005 гг. (Toledo и др., 2016b) и в Бразилии (Бауру) в 2012–2013 гг. (Toledo, 2015).

В 2015–2021 гг. ИКИ РАН в сотрудничестве с французскими коллегами провел адаптацию прибора ODS для установки на посадочную платформу проекта ЭкзоМарс-2022 (Zelenyi и др., 2015). Фактически, на основе прежней оптической схемы ODS был разработан новый прибор. Он был изготовлен, испытан и установлен на посадочной платформе научной миссии ЭкзоМарс-2022, которая проводится совместно ESA (Европейское космическое агентство) и Роскосмосом (на момент публикации статьи научная миссия ЭкзоМарс-2022 не реализована). Изменения в оптической схеме прибора, как и ее подробное описание будут подробно описаны в следующем разделе статьи, но кроме изменений в оптической схеме была переработана и конструкция прибора: в отличие от французской версии, оптическая и электронная части прибора собраны в едином корпусе. Как отмечалось выше, прибор являлся частью метеокомплекса. Научной задачей метеокомплекса являлся длительный мониторинг атмосферы Марса и ее состава, наблюдение за климатом планеты, а также изучение взаимодействия атмосферы и поверхности планеты. Приборы метеокомплекса, в том числе и ODS, располагались на посадочной платформе ЭкзоМарс-2022. Общий вид ODS показан на рис. 1.

В статье представлены основные характеристики прибора ODS. Описана созданная модель по расчету интенсивности рассеянного излучения в зависимости от характеристик атмосферы. Приведены результаты моделирования сигнала ODS для различных оптических толщин атмосферы и типов атмосферного аэрозоля. Подробно обсуждаются результаты проведенных полевых измерений и их сравнение с результатами моделирования. Основная цель проведенных и представленных в статье измерений – верификация моделирования оптической схемы прибора, а также исследование прохождения Солнца по полю зрения при различных положениях прибора в зависимости от даты и места проведения измерений.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И УСТРОЙСТВО ПРИБОРА ODS

В основе работы прибора лежит измерение интенсивности прямого и рассеянного солнечного излучения в течение дня в двух спектральных каналах, условно называемых синим и красным. Синий канал регистрирует излучение в диапазоне 350–460 нм, а красный – в диапазоне 730–1020 нм. Устройство и оптическая схема прибора ODS изображены на рис. 2а и 2б.



Рис. 1. Общий вид прибора ODS. В верхней части размещен оптический тракт, в нижней – плата электроники.

На рис. 2а представлен разрез прибора ODS, а на рис. 2б – принципиальная оптическая схема с изображением хода лучей. Как видно из рис. 2а, красный и синий каналы имеют независимые оптические тракты: синий канал показан слева на рис. 2а, а красный канал – справа. Каждый канал состоит из входной диафрагмы (1), двух параболических зеркал (2) и (3), между которыми заключена маска (4), светофильтра (5) и фотодетектора (6). Сигнал с фотодетектора поступает на логарифмический усилитель (не показан на рис. 2а), который преобразует фототок в выходное напряжение. Используемый усилитель позволяет регистрировать оптическое излучение с разными уровнями интенсивности: от слабого рассеянного излучения ($\sim 10^{-6}$ Вт/м²) до прямого солнечного излучения ($\sim 10^2$ Вт/м²).

Как видно из рис. 2а, единственным различием между каналами являются светофильтры. В синем канале в качестве светофильтра используется стекло СС-15 толщиной $d = 3$ мм, а в красном канале – склейка из двух стекол ФС-6 ($d = 2$ мм) и КС-19 ($d = 1$ мм). В обоих каналах ODS используется фотодиод Hamamatsu S1336-44BK. Данная конструкция прибора ODS, изображенная на рис. 2а, использовалась французскими коллегами при измерениях земной атмосферы (Toledo, 2015; Toledo и др., 2016b). Для установки ODS на посадочную платформу миссии ЭкзоМарс-2022 потребовалось снизить габариты и вес прибора; оптическая схема была оптимизирована с учетом характеристик приведенных выше светофильтров, которые обладают лучшим пропусканием по сравнению с французским прибором. На рис. 3а приведены спектральные характеристики используемых све-

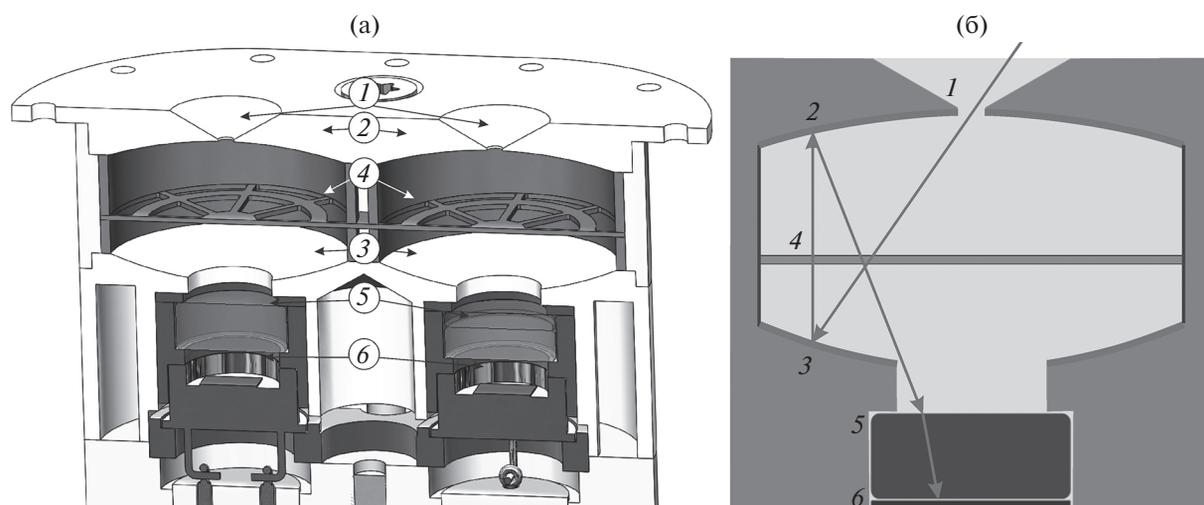


Рис. 2. Внутреннее устройство прибора ODS (а) и схематическое изображение хода лучей в приборе ODS (б). Устройство прибора ODS: 1 – входная диафрагма, 2 и 3 – параболические зеркала, 4 – маска, 5 – светофильтр, 6 – фотодетектор.

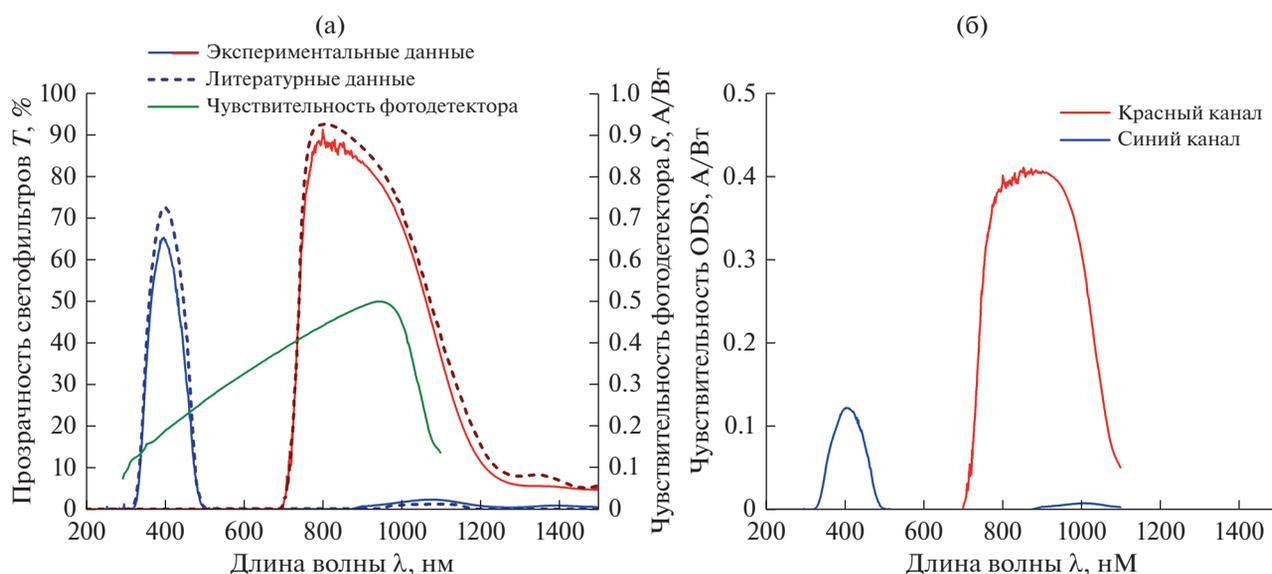


Рис. 3. Спектральные характеристики прибора ODS: (а) – спектральные характеристики оптических фильтров и фотодетектора, входящих в состав прибора; (б) – спектральная чувствительность красного и синего каналов ODS.

тофильтров и фотодиода, а на рис. 3б – чувствительность каждого из каналов ODS.

На рис. 3а пунктирными кривыми представлены литературные данные о спектральных характеристиках используемых светофильтров в синем и красном каналах ODS (Каталог компании “Электростекло”), а сплошными линиями обозначены экспериментально измеренные зависимости пропускания. Измерения проводились при помощи двух спектрометров – Ocean Optics HR4000 (рабочий диапазон длин волн $\lambda = 250\text{--}700$ нм) и Yokogawa A06370C (рабочий диапазон длин волн $\lambda = 600\text{--}1500$ нм). Из рис. 3а видно хо-

рошее совпадение между экспериментальными и теоретическими зависимостями пропускания светофильтров, отличия не превышают 10% по абсолютной величине пропускания. Также на рис. 3а показана спектральная чувствительность фотодиода Hamamatsu S1336-44BK, зеленая кривая (Hamamatsu datasheet). Максимальная чувствительность фотодиода достигается на длине волны $\lambda = 950$ нм. На рис. 3б представлена зависимость спектральной чувствительности каждого канала ODS, являющейся произведением пропускания светофильтра и чувствительности фотодетектора. Из зависимостей на рис. 3а и 3б следует, что спектральный диапазон синего канала

ODS главным образом определяется пропусканием светофильтра, а диапазон красного канала – как пропусканием светофильтра, так и чувствительностью детектора. В частности, длинноволновая граница красного канала определяется красной границей фотодиода и приблизительно равна $\lambda = 1020$ нм. Данные зависимости использовались при проведении моделирования выходного сигнала ODS. Основные принципы проведенного моделирования, а также его результаты представлены ниже.

Характерный вид выходного сигнала для случая безоблачной атмосферы представлен на рис. 4. Измерения были проведены 09.09.2021 г. в поселке Витино (Крым).

На рис. 4 вертикальными пунктирными линиями отмечен промежуток времени, в течение которого прибор ODS мог детектировать как рассеянное, так и прямое солнечное излучение – с 11:00 до 12:45 и с 13:00 до 14:15. Также на данном рисунке вертикальными штриховыми линиями представлено время восхода (06:18) и заката Солнца (19:10) для указанной даты и места измерений. Из уровней сигнала при прямом и рассеянном солнечном излучении можно определить среднесуточное значение оптической толщины атмосферы. Кроме того, наличие двух спектральных каналов позволяет определить характерный размер аэрозоля в атмосфере (Toledo и др., 2016b).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ПРИБОРА ODS

В данном разделе приведены исходные данные, использованные при моделировании атмосферы и величины рассеянного ею излучения. Расчет проводился в соответствии с типом выбранного аэрозоля, его эффективным размером, вертикальным распределением в атмосфере, оптической толщиной атмосферы, а также с учетом типа подстилающей поверхности, места и времени измерений с ODS. Учитывая перечисленные параметры и представленные выше характеристики прибора (поле зрения и спектральная чувствительность двух оптических каналов), можно рассчитать величину выходного сигнала при помощи следующего выражения (Toledo и др., 2016b):

$$\begin{aligned}
 i = & S_{\text{pupil}} \int_0^{\infty} R_{\text{diode}}(\lambda) T_{\text{filter}}(\lambda) T_{\text{mask}} \times \\
 & \times (\mu_0, \phi_0, \lambda) \mu_0 \Phi \exp(-\tau/\mu_0) d\lambda + \\
 & + S_{\text{pupil}} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^0 I(\tau, \mu_0, \mu, \phi, \lambda) R_{\text{diode}}(\lambda) \times \\
 & \times T_{\text{filter}}(\lambda) T_{\text{mask}}(\mu_0, \phi_0, \lambda) \mu d\mu d\phi d\lambda,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где i – фототок на выходе фотодетектора, S_{pupil} – площадь входного зрачка, $R_{\text{diode}}(\lambda)$ – спектральная

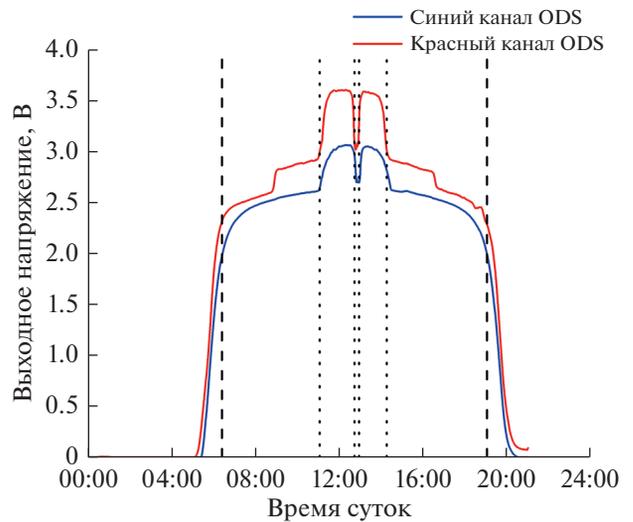


Рис. 4. Выходной сигнал прибора ODS в случае безоблачной атмосферы.

чувствительность фотодетектора, $T_{\text{mask}}(\mu_0, \phi_0, \lambda)$ – поле зрения прибора, Φ – интенсивность солнечного излучения, τ – оптическая толщина атмосферы, μ_0 – косинус солнечного зенитного угла θ_0 , ϕ_0 – солнечный азимутальный угол, $I(\tau, \mu_0, \mu, \phi, \lambda)$ – интенсивность рассеянного атмосферой излучения с длиной волны λ , приходящего с направления μ, ϕ (μ – косинус зенитного угла наблюдения θ , ϕ – азимутальный угол наблюдения) при условии, что положение Солнца определяется величинами μ_0 и ϕ_0 . Как видно из выражения (1), выходной сигнал с фотодетектора складывается из двух слагаемых: первое описывает воздействие прямого солнечного излучения, второе – воздействие излучения, рассеянного в атмосфере. Форма выходного сигнала напрямую зависит от поля зрения прибора $T_{\text{mask}}(\mu_0, \phi_0, \lambda)$ и его установки в ходе измерений, что будет показано далее. Общий вид поля зрения ODS приведен на рис. 5 при помощи цветовой карты. Красному цвету соответствует максимальная величина пропускания, а синему – минимальная. При этом само поле зрения представлено в полярных координатах, где вдоль радиуса отложена величина зенитного угла наблюдения θ , а азимутальный угол на рис. 5 соответствует азимутальному углу наблюдения ϕ .

Из рис. 5 следует, что представленная функция пропускания поля зрения прибора ODS является периодически повторяющейся для азимутального угла ϕ с периодом 45° . Пропускание поля зрения отлично от нуля в интервале зенитных углов $\theta = 19^\circ - 30^\circ$ и $\theta = 35^\circ - 43^\circ$. Максимальная величина на пропускания составляет около 70%, что определяется потерями на двух параболических зеркалах, установленных в каждом из каналов ODS (рис. 2а).

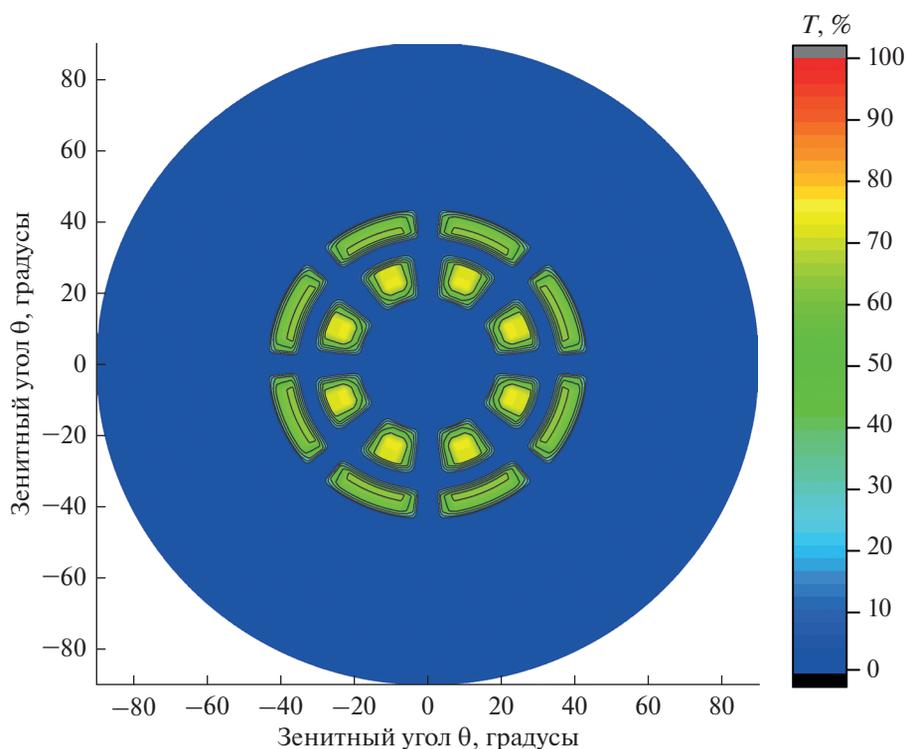


Рис. 5. Поле зрения прибора ODS, цветовая шкала обозначает величину пропускания оптической схемы прибора.

Модель по обработке выходного сигнала ODS основывается на расчете интенсивности рассеянного излучения при помощи программы с открытым кодом SHDOM (Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method – метод сферических гармоник и дискретных ординат) (Evans, 2007). При помощи этой программы производится расчет интенсивности рассеянного излучения в приближении многократного рассеяния для псевдосферической геометрии атмосферы с учетом подстилающей поверхности. Созданная модель была адаптирована для земной атмосферы, где в качестве исходных данных использовались разные типы аэрозоля – песок, морская соль, углеродистый аэрозоль и т.д. Тип аэрозоля выбирался в зависимости от места проведения верификационных измерений. Основные параметры рассеяния, такие как экстинкция, альbedo однократного рассеяния, параметр асимметрии, а также индикатриса рассеяния для каждого типа аэрозоля рассчитывались при помощи теории Ми (Тимофеев, Васильев, 2003). При расчетах считалось, что частицы имеют сферическую форму, а зависимость концентрации от их размеров подчиняется логнормальному распределению (Тимофеев, Васильев, 2003). При этом также полагалось, что рассеяние на каждой частице происходит независимо от других частиц, а при рассеянии оптического излучения не меняет длину волн (отсутствуют квантовые переходы). Также считалось, что аэрозоль находится в состоянии равновесия в атмосфере и

скорость вертикального переноса вещества является малой. Поэтому использовалось экспоненциальное распределение концентрации аэрозоля с характерной высотой распределения аэрозоля в атмосфере $H_0 = 3–5$ км. Кроме рассеяния излучения на аэрозоле, при проведении вычислений было учтено рэлеевское рассеяние (Bodhaine и др., 1999). В качестве начальных данных для расчета экстинкции слоя атмосферы из-за рассеяния Рэля использовались профили температуры и давления, полученные из базы данных ERA5 (Hersbach и др., 2020). Земная поверхность моделировалась ламбертовой поверхностью с фиксированным альbedo. Расчет проводился для солнечных зенитных углов θ_0 в интервале $\theta_0 = 0^\circ–86^\circ$ с шагом 1° , при этом для каждого положения Солнца рассчитывались интенсивности рассеянного излучения $I(\tau, \mu_0, \mu, \phi, \lambda)$ для зенитных и азимутальных углов наблюдения в интервалах $\theta = 0^\circ–90^\circ$ и $\phi = 0^\circ–360^\circ$ с шагом 1° для обеих координат θ, ϕ , соответственно. Интенсивность рассеянного излучения вычислялась для всех длин волн λ каждого канала ODS с шагом в 10 нм. Следует отметить, что в литературе представлены результаты аналогичного моделирования для французского прототипа прибора ODS (Toledo, 2015; Toledo и др., 2016a). В этих работах подробно обсуждаются вопросы влияния параметров моделирования (эффективный радиус аэрозоля, его распределение в атмосфере с высотой, оптическая

толщина атмосферы) на выходной сигнал ODS. Наибольшее влияние на вид выходного сигнала с ODS оказывает величина оптической толщины атмосферы, при этом изменение параметров распределения частиц (r_{eff} и V_{eff}) оказывают менее выраженное влияние на вид выходного сигнала с ODS (Toledo и др., 2016a).

Величина фототока, рассчитанная при помощи выражения (1), преобразовывалась в выходное напряжение по следующей формуле (фототок i выражен в наноамперах):

$$V_{\text{out}}[\text{V}] = 0.477 \times \lg(i) + 1.661, [i] = \text{нА}. \quad (2)$$

Полученное в результате лабораторных калибровок выражение (2) описывает характеристику логарифмических усилителей, установленных на выходе каждого оптического канала ODS.

В качестве примера на рис. 6а и 6б приведены результаты расчета выходного сигнала для двух спектральных каналов ODS в зависимости от величины оптической толщины аэрозоля в атмосфере $\tau_A = 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8$. Расчет проводился для углеродистого аэрозоля с эффективным радиусом $r_{\text{eff}} = 0.3$ мкм, распределенного в атмосфере по экспоненциальному закону с характерной высотой $H_0 = 3$ км. В данных расчетах альbedo поверхности было выбрано равным $A = 0.3$, что соответствует сухому бетону (Тимофеев, Васильев, 2003).

Из представленных результатов видно, что при увеличении оптической толщины аэрозоля τ_A уменьшается выходной сигнал, обусловленный прямым солнечным излучением. Однако сигнал, обусловленный рассеянием излучения в атмосфере, увеличивается. Наиболее ярко данный эффект проявляется в красном канале ODS, рис. 6б. Такая зависимость выходного сигнала от оптической толщины аэрозоля связана с наличием рассеяния Рэлея, которое наиболее сильно проявляется в синем канале ODS. Зависимость оптической толщины рэлеевского рассеяния τ_R от длины волны света приведена на рис. 6в. Из рисунка следует, что среднее значение τ_R в синем спектральном канале составляет около $\tau_R \sim 0.5$, тогда как в красном канале — $\tau_R \sim 0.03$. Поэтому в синем канале большой вклад в рассеяние излучения вносит рассеяние Рэлея, что проявляется в слабой зависимости выходного сигнала от величины оптической толщины аэрозоля τ_A (рис. 6а).

Верификационные измерения прибора ODS проходили в Москве в июле 2021 г. и в Крыму в сентябре 2021 г. Представленные на рис. 6а и 6б теоретические кривые использовались для обработки полученных экспериментальных данных с целью проверки правильности моделирования оптической схемы, а также для анализа влияния ориентации прибора ODS на вид его выходного сигнала в зависимости от места и времени прове-

денных измерений. Полученные теоретические зависимости также использовались для оценки оптической толщины атмосферы τ в двух спектральных каналах ODS для указанных измерений. При проведении моделирования положение прибора (поворот маски вокруг оси симметрии) подбиралось таким образом, чтобы достичь наилучшего совпадения с экспериментальными данными. Эти результаты представлены в следующем разделе статьи.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ВЕРИФИКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В данном разделе описаны результаты проведенных в 2021 г. верификационных измерений в г. Москва и в пос. Витино (Крым). Указанные измерения проводились в разное время и в разных условиях с целью проверки правильности созданной модели рассеяния солнечного излучения в атмосфере. В ходе моделирования использовались разные типы оптического аэрозоля: для обработки измерений, проведенных в Москве, был выбран углеродистый аэрозоль, а для обработки измерений в Витино — морская соль и песчаный аэрозоль. Результаты этих измерений, а также результаты моделирования приведены на рис. 7а и 7б и 8а и 8б. На рис. 7а и 8а представлены экспериментальные и модельные зависимости выходного сигнала ODS от местного времени суток, а на рис. 7б и 8б приведена часть поля зрения прибора ODS с наложенной зависимостью суточного движения Солнца для указанного места и времени проведения измерений. По представленным на этих рисунках зависимостям можно наглядно оценить время, в течение которого прямое солнечное излучение может проходить через поле зрения прибора ODS.

Из представленных результатов видно, что при проведении измерений в Москве в 14.07.2021 г. только первая половина дня была безоблачной. Облачная погода во второй половине дня сильно повлияла на сигнал ODS, вызвав его хаотические изменения, поэтому в качестве основы для моделирования была выбрана та часть данных, которая обозначена вертикальными штриховыми линиями на рис. 7а. Слева выбранный диапазон ограничен временем 4 ч 50 мин местного времени (UTC+3), а справа — временем появления облачности, приблизительно 11 ч 15 мин. Для выбранного участка было проведено моделирование выходного сигнала ODS, а также поиск оптимального значения оптической толщины атмосферы τ для каждого спектрального канала ODS.

Поиск оптимального значения оптической толщины τ проводился путем минимизации функционала следующего вида:

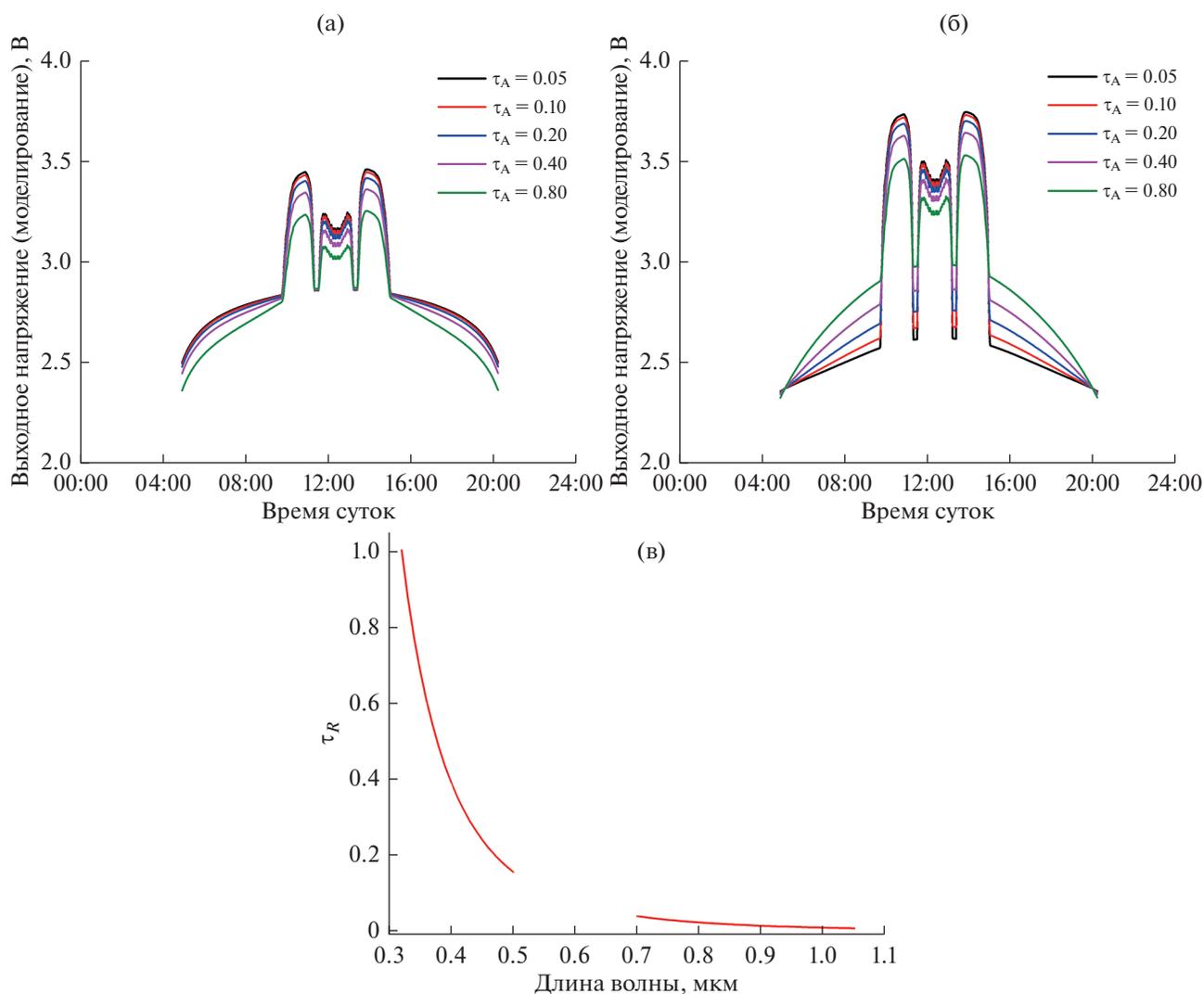


Рис. 6. Моделирование выходного сигнала ODS при рассеянии на углеродистом аэрозоле для разной оптической толщины в двух спектральных каналах: (а) – синий канал, (б) – красный канал, (в) – оптическая толщина атмосферы, обусловленная рассеянием Рэлея, в зависимости от длины волн.

$$\Psi(\tau) = \sum_{i=1}^N ([S_{\text{exp}}(t_i) - O(t_i, \tau)] / O(t_i, \tau))^2, \quad (3)$$

где $S_{\text{exp}}(t_i)$ – величина сигнала, измеренная с прибором ODS в момент времени t_i , $O(t_i, \tau)$ – величина смоделированного сигнала в момент времени t_i и при оптической толщине атмосферы τ . Важно отметить, что синий и красный спектральные каналы ODS обрабатывались отдельно друг от друга, поэтому ниже будут приведены оптические толщины для каждого спектрального канала в отдельности.

На рис. 7а сигнал $S_{\text{exp}}(t_i)$ представлен сплошными кривыми, цвет которых соответствует спектральному каналу ODS (синему и красному, соответственно), а теоретический сигнал $O(t_i, \tau)$ – пунктирными кривыми с таким же принципом

определения цвета. Как следует из представленных на рис. 7а зависимостей, получено хорошее совпадение между экспериментальными и модельными зависимостями, полученными путем минимизации функционала (3). Оптическая толщина атмосферы, которая соответствует приведенным модельным зависимостям, оказалась равной $\tau = 0.83 \pm 0.19$ для синего спектрального канала и $\tau = 0.41 \pm 0.09$ для красного. Данные ODS, полученные вблизи времени восхода Солнца (4 ч 4 мин местного времени, UTC+3) в представленном расчете не учитывались, так как измерения проводились в мегаполисе, где присутствует много искусственного освещения, дающего паразитную засветку поля зрения прибора. В созданной модели искусственное освещение не учитывалось.

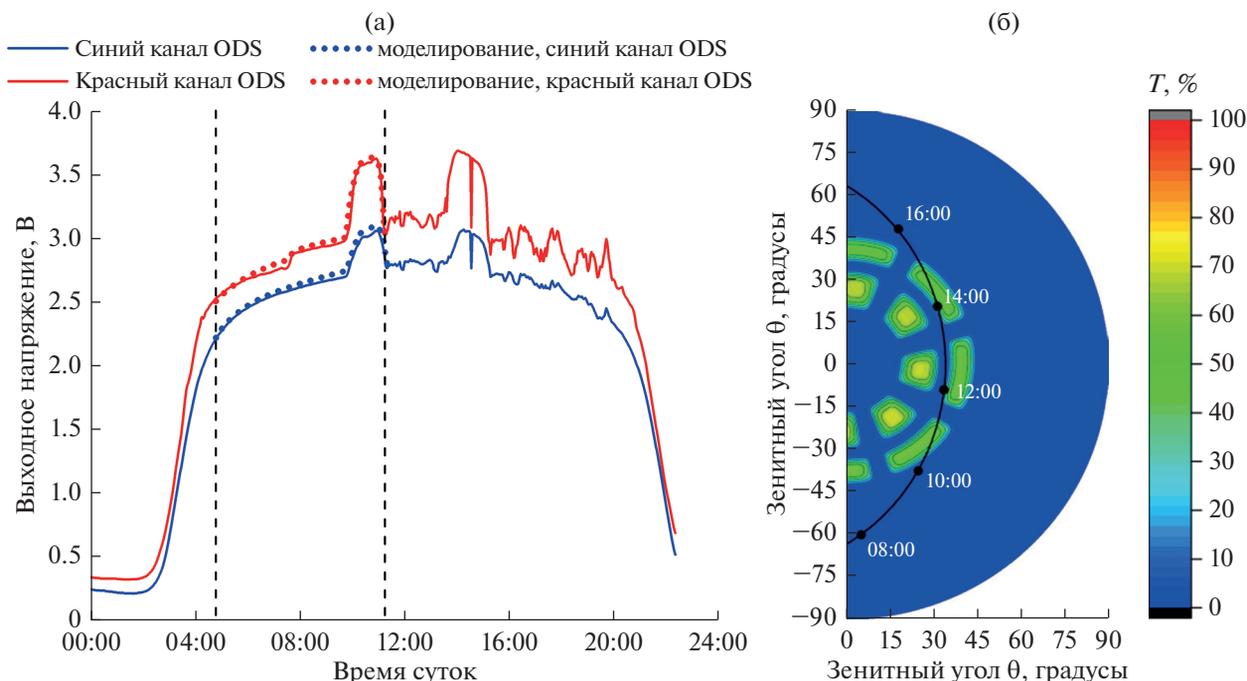


Рис. 7. Результаты верификационных измерений в Москве 14.07.2021 г.: (а) – выходной сигнал ODS с наложенными модельными зависимостями; (б) – поле зрения прибора ODS с наложенной траекторией движения Солнца.

На рис. 7б представлена часть поля зрения прибора ODS в виде цветовой карты (аналогично рис. 5), на которую наложена кривая суточного хода солнца в Москве в 14.07.2021 г. Точками отмечено положение Солнца на небесной сфере в определенное время суток. Из этой зависимости следует, что наблюдение прямого солнечного излучения с прибором ODS было возможно приблизительно с 10:00 до 11:15 и с 13:30 до 15:15, что подтверждается результатами моделирования и измерений (рис. 7а).

Также из рис. 7а видно, что вблизи полудня в красном спектральном канале наблюдается пьедестал в выходном сигнале, который не наблюдается в синем канале. Данное поведение выходного сигнала связано с конструктивными особенностями прибора ODS, так как во-первых, изменение сигнала происходит скачкообразно, что вряд ли может быть объяснено атмосферными эффектами, а во-вторых, данный эффект наблюдается лишь в одном спектральном диапазоне. Данный эффект наблюдается и в результатах полевых измерений, проведенных в Витино (рис. 8а). Более подробно этот эффект рассмотрен ниже.

На рис. 8а представлены результаты, полученные в ходе измерений в Витино в 09.09.2021 г. (черноморское побережье Крыма). Как видно из рис. 8а, на протяжении всего дня 09.09.2021 г. наблюдалась безоблачная погода, поэтому моделирование проводилось для всей длительности светового дня: от 6:21 (восход Солнца) до 19:08 (закат

Солнца) по местному времени (UTC+3). В данном случае при моделировании в качестве аэрозоля был выбран песок. Эффективный радиус частиц был равен $r_{\text{eff}} = 0.1$ мкм, а альbedo поверхности $A = 0.1$, что соответствует водной поверхности ($A = 0.05-0.1$) или почве ($A = 0.05-0.15$). Из рис. 8а видно хорошее совпадение между теоретическими и экспериментальными данными, что подтверждает правильность выбора типа аэрозоля и подстилающей поверхности. На основе проведенного моделирования были получены следующие значения оптической толщины для синего и красного спектральных каналов: $\tau = 0.67 \pm 0.08$ и $\tau = 0.12 \pm 0.07$ соответственно. Следует отметить, что, в отличие от результатов, полученных в Москве, по результатам измерений в Витино наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и модельных зависимостей сигнала на выходе ODS вблизи восхода и заката Солнца. На рис. 8б представлена часть поля зрения прибора ODS с наложенной траекторией движения Солнца в Витино в 09.09.2021 г.

На рис. 8а также можно видеть пьедестал в сигнале красного канала ODS, аналогичный московским измерениям (рис. 7а). Данный эффект связан с тем, что в определенном интервале углов падающее оптическое излучение проходит через входную апертуру (1) и попадает на внутреннюю стенку прибора ODS, минуя зеркала (2) и (3) и маску (4) (рис. 9). Рассеяние прямого солнечного излучения от поверхности стенки создает допол-

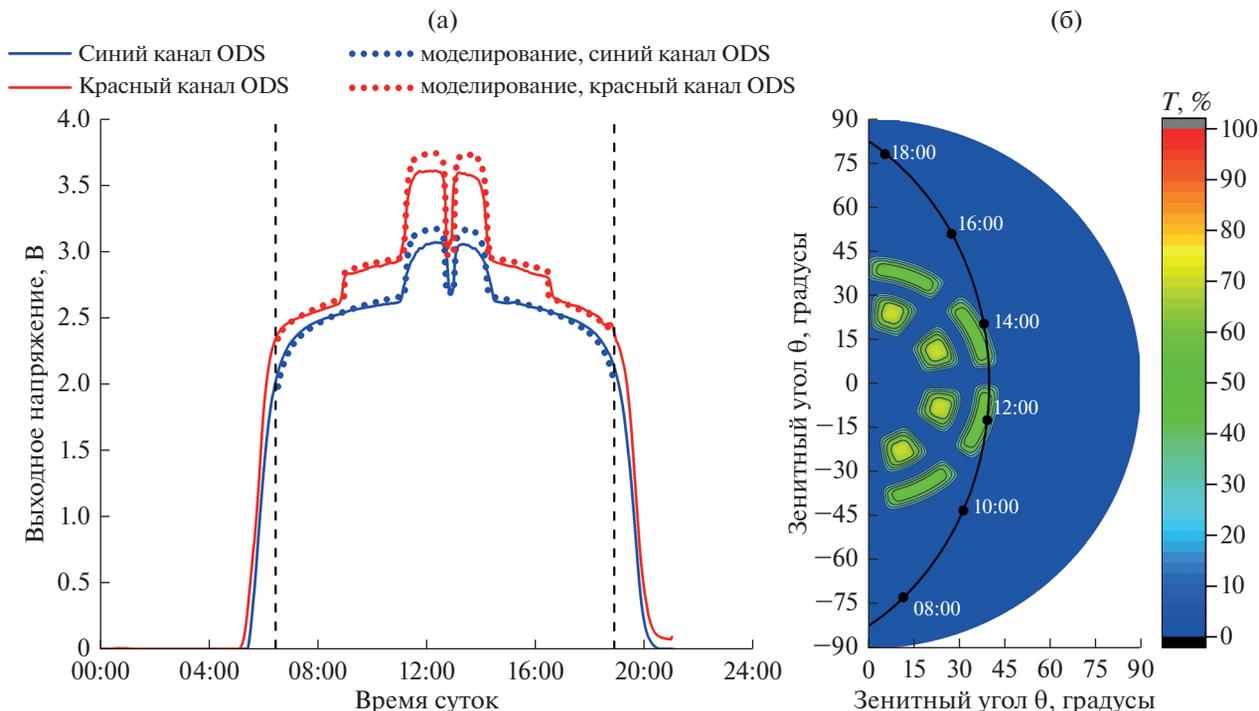


Рис. 8. Результаты верификационных измерений в Витино 09.09.2021 г.: (а) – выходной сигнал ODS с наложенными модельными зависимостями; (б) – поле зрения прибора ODS с наложенной траекторией движения Солнца.

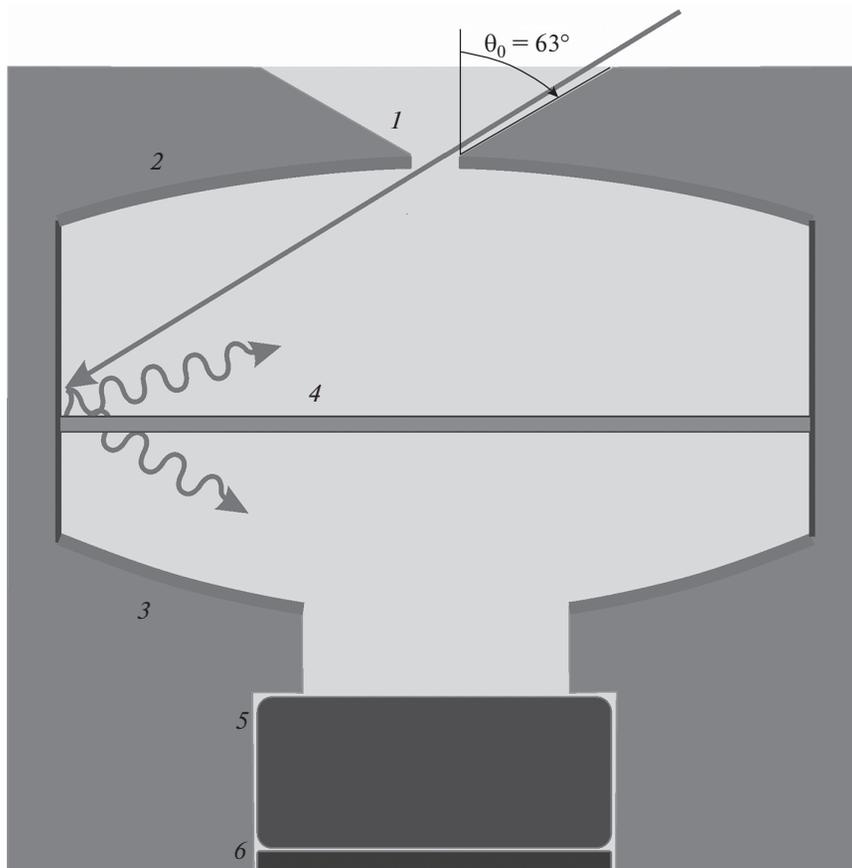


Рис. 9. Оптическая схема прибора с ходом лучей, поясняющая пьедестал выходного сигнала; цифрами обозначены: 1 – входная диафрагма, 2 и 3 – параболические зеркала, 4 – маска, 5 – светофильтр, 6 – фотодетектор.

нительную засветку на фотодетекторе. Подтверждением этому является тот факт, что момент времени, при котором появляется данный скачок сигнала в красном канале, связан с солнечным зенитным углом θ_0 , который оказался равен $\theta_0 = 63^\circ$. Этой же величине равен угол наклона фаски при входном зрачке на входной плоскости прибора ODS (рис. 9).

Для наблюдения пьедестала сигнала в синем канале прибора были проведены лабораторные измерения, в ходе которых на входной зрачок ODS посылалось мощное лазерное излучение (He-Cd лазер, длина волны $\lambda = 442$ нм) под различными углами θ_0 . В результате был обнаружен аналогичный красному каналу ход зависимости сигнала от угла θ_0 . При этом величина критического угла, при превышении которого выходной сигнал ODS обращался в нуль, составила $\theta_0 = 62^\circ \pm 1^\circ$, что в пределах погрешности совпадает с углом наклона фаски. В условиях же полевых измерений скачок выходного сигнала в синем канале ODS не наблюдался из-за недостаточной интенсивности солнечного излучения, а также из-за характеристик анодного покрытия внутренних стенок прибора, по всей видимости, имеющих более слабый коэффициент отражения в синей части спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведено описание прибора ODS, который предназначен для измерения среднесуточной величины оптической толщины атмосферы Марса. Прибор был включен в состав метеоконтекста посадочной платформы миссии Экзо-Марс-2022. Приведены оптическая схема и спектральные характеристики двух оптических каналов ODS. Описана методика моделирования прямого и рассеянного солнечного излучения в зависимости от типа и параметров аэрозоля, взвешенного в атмосфере. Представлены результаты проведенных верификационных измерений прибора ODS в Москве и в Витино (Крым). Полученные результаты демонстрируют удовлетворительное совпадение между модельными и экспериментальными данными, что показывает адекватность описания оптических свойств атмосферы и параметров прибора ODS в созданной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Каталог производственной компании ООО “Электростекло”, Спектральные характеристики пропускания образцов цветного стекла. http://www.elektrosteklo.ru/Elektrosteklo_Color_Glass_Spectral_Transmittance.pdf

Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. Санкт-Петербург: Наука, 2003. 473 с.

- Bodhaine B.A., Wood N.B., Dutton E.G., Slusser J.R.* On Rayleigh Optical Depth Calculations // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 1999. V. 16. P. 1854–1861.
- Cantor B.A.* MOC observations of the 2001 Mars planet-encircling dust storm // *Icarus*. 2007. V. 186. P. 60–96. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.08.019>
- Clancy R.T., Sandor B.J., Wolff M.J., Moriarty-Schieven G.* The orbital (Ls) variation of thermal structure over the 60–80 km Mars atmospheric region // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № E4. P. 9553–9572.
- Evans K.F.* SHDOMPPDA: A Radiative Transfer Model for Cloudy Sky Data Assimilation // *J. Atmos. Sci. Special section*. 2007. P. 3854–3864. <https://doi.org/10.1175/2006JAS2047.1>
- 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 // *Sol. Syst. Res.* 2004. V. 38. P. 421–433. <https://doi.org/10.1007/s11208-005-0009-2>
- Guzewich S.D., Lemmon M., Smith C.L., Martínez G., de Vicente-Retortillo Á., Newman C.E., Baker M., Campbell C., Cooper B., Gómez-Elvira J., Harri A.-M., Hassler D., Martin-Torres F.J., McConnochie T., Moores J.E., Kahanpää H., Khayat A., Richardson M.I., Smith M.D., Sullivan R., Juarez M.T., Vasavada A.R., Viúdez-Moreiras D., Zeitlin C., Mier M.-P.Z.* Mars Science Laboratory observations of the 2018/Mars year 34 global dust storm // *J. Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 71–79. <https://doi.org/10.1029/2018GL080839>
- Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R.* The Atmosphere and Climate of Mars. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. 588 p. <https://doi.org/10.1017/9781139060172>
- Hamamatsu datasheet, <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S1336-8BK.html>
- Harri A.-M., Linkin V., Polkko J., Marov M., Pommereau J.-P., Lipatov A., Siili T., Manuilov K., Lebedev V., Lehto A., Pellinen R., Pirjola R., Carpentier T., Malique C., Markarov V., Khloustova L., Esposito L., Maki J., Lawrence G., Lystsev V.* Meteorological observations on Martian surface: Met-packages of Mars-96 Small Stations and Penetrators // *Planet. and Space Sci.* 1998. V. 46. Iss. 6–7. P. 779–793. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(98\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(98)00012-9)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Kleinboehl A., Spiga A., Kass D.M., Shirley J.H., Millour E., Montabone L., Forget F.* Diurnal variations of dust during the 2018 global dust storm observed by the Mars Climate Sounder // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2020.

- V. 125. id. e2019JE006115 (21 p.).
<https://doi.org/10.1029/2019JE006115>.
- Lemmon M.T., Wolff M.J., Bell J.F., Smith M.D., Cantor B.A., Smith P.H.* Dust aerosol, clouds, and the atmospheric optical depth record over 5 Mars years of the Mars Exploration Rover mission // *Icarus*. 2015. V. 251. P. 96–111.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.029>
- Linkin V., Harri A.-M., Lipatov A., Belostotskaja K., Derbunovich B., Ekonomov A., Khloustova L., Kremnev R., Makarov V., Martinov B., Nenarokov D., Prostov M., Pustovalov A., Shustko G., Järvinen I., Kivilinna H., Korpela S., Kumpulainen K., Lehto A., Pellinen R., Pirjola R., Riihelä P., Salminen A., Schmidt W., Siili T., Blamont J., Carpentier T., Debus A., Hua C.T., Karczewski J.-F., Laplace H., Levacher P., Lognonné Ph., Malique C., Menvielle M., Mouli G., Pommereau J.-P., Quotb K., Runavot J., Vienne D., Grunthaler F., Kuhnke F., Musmann G., Rieder R., Wänke H., Economou T., Herring M., Lane A., McKay C.P.* 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)
- Lorenz R.D., Martínez G.M., Spiga A., Vicente-Retortillo A., Newman C.E., Murdoch N., Forget F., Millour E., Pieron T.* Seasonal deposition and lifting of dust on Mars as observed by the Curiosity Rover // *Planet. and Space Sci.* 2021. V. 207. 14 p.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105337>.
- Maria J.-L., Tran T.T., Pommereau J.-P., Rannou P., Malique C., Correia J.J., Porteneuve J.* Scientific aspects of the optical depth sensor // *Adv. Space Res.* 2006. V. 38. P. 726–729.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.08.021>
- Markiewicz W., Sablotny R., Keller H., Thomas N., Titov D., Smith P.* Optical properties of the Martian aerosols as derived from Imager for Mars Pathfinder midday sky brightness data // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 9009–9017.
<https://doi.org/10.1029/1998JE900033>
- Markiewicz W.J., Keller H.U., Thomas N., Titov D., Forget F.* Optical properties of the Martian aerosols in the visible spectral range // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29. Iss. 2. P. 175–181.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00567-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00567-1)
- Martin L.J.* The Major Martian Dust Storms of 1971 and 1973 // *Icarus*. 1974. V. 23. P. 108–115.
[https://doi.org/10.1016/0019-1035\(74\)90108-0](https://doi.org/10.1016/0019-1035(74)90108-0)
- 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>
- Montabone L., Spiga A., Kass D.M., Kleinböhl A., Forget F., Millour E.* Martian year 34 column dust climatology from Mars climate sounder observations: Reconstructed maps and model simulations // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2020. V. 125. id. e2019JE006111 (30 p.).
<https://doi.org/10.1029/2019JE006111>.
- Montmessin F., Rannou P., Cabane M.* New insights into Martian dust distribution and water-ice cloud microphysics // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2002. V. 107. Iss. E6. P. 4.1–4.14.
<https://doi.org/10.1029/2001JE001520>.
- Smith P.H., Tomasko M.G., Britt D., Crowe D.G., Reid R., Keller H.U., Thomas N., Gliem F., Rueffer P., Sullivan R., Greeley R., Knudsen J.M., Madsen M.B., Gunnlaugsson H.P., Hviid S.F., Goetz W., Soderblom L.A., Gaddis L., Kirk R. et al.* The imager for Mars Pathfinder experiment // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № E2. P. 4003–4025.
<https://doi.org/10.1029/96JE03568>
- Smith M.D.* THEMIS observations of Mars aerosol optical depth from 2002–2008 // *Icarus*. 2009. V. 202. P. 444–452.
<https://doi.org/10.1016/J.ICARUS.2009.03.027>
- Toledo D.* Preparation and validation of the cloud and dust opacity sensor ODS for ExoMars 2018 mission // Candidate's thesis, Reims. 2015. 182 p.
- Toledo D., Rannou P., Pommereau J.-P., Foujols T.* The optical depth sensor (ODS) for column dust opacity measurements and cloud detection on Martian atmosphere // *Exp. Astron.* 2016a. V. 42. P. 61–83.
<https://doi.org/10.1007/s10686-016-9500-7>
- Toledo D., Rannou P., Pommereau J.-P., Sarkissian A., Foujols T.* Measurement of aerosol optical depth and subvisual cloud detection using the optical depth sensor (ODS) // *Atmos. Meas. Tech.* 2016b. V. 9. P. 455–467.
<https://doi.org/10.5194/amt-9-455-2016>
- Toledo D., Arruego I., Apéstigue 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>
- Tran T.T., Pommereau J.-P., Rannou P., Maria J.-L.* Technical aspect of the optical depth sensor // *Adv. Space Res.* 2005. V. 36. P. 2182–2186.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.07.079>
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.10.029>
- 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. № 7. P. 509–517.
- Zurek R.W.* Martian great dust storms: An update // *Icarus*. 1982. V. 50. Iss. 2–3. P. 288–310.
[https://doi.org/10.1016/0019-1035\(82\)90127-0](https://doi.org/10.1016/0019-1035(82)90127-0)