

УДК 520.6.07

Ю. С. Иванов, И. И. Синявский, М. Г. Сосонкин

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ЭШЕЛЕ-СПЕКТРОМЕТРА MIR ДЛЯ МИССИИ ЭКЗОМАРС

Программой ЭкзоМарс планируется запуск орбитального зонда к Марсу — Trace Gas Orbiter (TGO). Основной задачей TGO должно стать комплексное изучение атмосферы Марса, исследование вертикального распределения малых составляющих, метана, поиск органических молекул (C_2H_2 , C_2H_6 и т. д.), других малых составляющих, поиск возможных источников и стоков, а также измерения изотопных соотношений и их вариаций. Для решения этой задачи разработан эшелле-спектрометр среднего ИК-диапазона MIR, работающий в режиме солнечных затмений в диапазоне 2.2—4.4 мкм с разрешением до 50000. Описана оптическая схема и техническая реализация прибора.

Ключевые слова: атмосфера Марса, изотопный состав, спектрометр высокого разрешения.

MIR — эшелле-спектрометр высокого разрешения, предназначенный для работы на орбите Марса в солнечно-затменном режиме в диапазоне 2.2 — 4.4 мкм с разрешением до 50000. Разделение порядков — скрещённой дисперсией, двумя сменными дифракционными решётками, что позволяет одновременно регистрировать до семнадцати 200-нм полос спектра. Основная задача — прецизионные измерения содержания малых газовых составляющих и их изотопного состава. Кроме того, MIR может обнаруживать метан в надир, используя отдельный детектор, оптимизированный для диапазона 3.3 мкм. В работе обсуждается состояние разработки и техническая реализация прибора.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

В рамках программы ЭкзоМарс Европейское космическое агентство планирует в 2016 г. запуск орбитального зонда к Марсу — Trace Gas Orbiter (TGO). Основной задачей TGO будет

комплексное исследование атмосферы Марса, исследование вертикального распределения малых составляющих, в первую очередь метана, поиск органических молекул (углеводородов C_2H_2 , C_2H_6 и т. д.), других малых составляющих, поиск возможных источников и стоков, измерения изотопных соотношений и их вариаций [4, 6]. Подобная задача может быть решена с помощью спектрометров высокого разрешения в ближнем и среднем ИК-диапазоне. Поэтому было принято решение о создании соответствующего комплекса приборов [2]. Комплект ACS (Atmospheric Chemistry Suit) состоит из трех спектрометров: NIR — эшелле-спектрометр с акустооптической фильтрацией света ближнего ИК-диапазона, MIR — эшелле-спектрометр среднего ИК-диапазона, TIRVIM — фурье-спектрометр теплового диапазона.

Одной из главных задач прибора MIR является детектирование метана в атмосфере Марса. Планируемые измерения с высокой чувствительностью должны надёжно подтвердить обнаружение или существенно уменьшить значение верхнего предела его содержания в атмосфере [5].

© Ю. С. ИВАНОВ, И. И. СИНЯВСКИЙ, М. Г. СОСОНКИН, 2015

Измерения отношения D/H в атмосфере Марса до сих пор опирались на астрономические спектральные наблюдения, причем линии обычной и дейтерированной воды не удавалось измерить одновременно. В связи с этим погрешность измерения D/H остается значительной. Также никогда не был измерен вертикальный профиль отношения HDO/H₂O. В эксперименте MIR полосы поглощения водяного пара могут быть измерены в нескольких порядках и с высокой точностью. Поэтому будет возможно провести одновременные измерения H₂O и HDO с целью повышения точности полученного ранее отношения D/H в водяном паре и измерения его вертикального профиля.

Метод солнечных затмений позволяет также измерять рассеяние света атмосферным аэрозолем на лимбе. Такие измерения необходимо проводить в широком спектральном диапазоне, но наиболее характерные особенности поглощения света частицами атмосферного аэрозоля проявляются в диапазоне длин волн, сравнимом с характерными размерами частиц, т. е. в ближнем ИК-диапазоне. Измерения экстинкции аэрозоля в экспериментах NIR и MIR будут проводиться в спектральных порядках по участкам спектрального континуума между линиями атмосферных газов [3].

Эксперимент также предоставляет широкие возможности для исследования изотопических полос CO₂, а также для поиска новых молекул атмосферных газов (например H₂CO, C₂H₆, HCl) [1].

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Прибор построен по классической схеме со скрещенной дисперсией (рис. 1). Излучение от Солнца, пройдя марсианскую атмосферу, зеркалом 1 направляется на входной объектив 2. Послеломающего зеркала 3 оно фокусируется на входной щели размером 0,4 × 0,05 мм, а затем коллимируется двухзеркальным коллиматором 4 и попадает на эшелле 5 частотой 3 мм⁻¹ и углом блеска 64,43°. Эшелле работает в высоких порядках (от 142 до 258), и смесь спектров этих порядков фокусируется двухзеркальным коллиматором 4 в фокальной плоскости линзового коллиматора 6, назначение которого — получение параллель-

ных пучков для дальнейшего разделения этих порядков. Это разделение осуществляется дифракционной решёткой 7, после чего лучи фокусируются камерным трёхлинзовым объективом 8 на охлаждаемой КРТ-матрице 9, образуя строки, соответствующие различным порядкам. Для разделения спектров в заданном широком спектральном диапазоне дифракционная решётка сделана двусторонней. Излучение коротких длин волн разделяется решёткой 361,2 мм⁻¹. При переходе к длинноволновому диапазону решётка поворачивается шаговым приводом на 180°, и в ход лучей вводится её сторона с нарезкой 180 мм⁻¹. В каждой позиции решётка может разворачиваться (тем же приводом) с шагом 1,8° для сканирования по избранному диапазону. При этом на приёмнике формируются 10 кадров (по 5 в каждом диапазоне). В каждом кадре, в зависимости от диапазона, от 7 до 17 строк. Таким образом, длинный спектр с общим разрешением 50...60 тысяч элементов разбивается на 106 строк с поочерёдной укладкой их групп на плоскости приёмника.

Особенностью схемы является наличие у приёмника холодной диафрагмы небольшого размера. Во избежание виньетирования выходной зрачок всей системы должен быть вынесен в плоскость холодной диафрагмы. Достигается это следующим приёмом: наклонное зеркало, расположенное вблизи промежуточного фокуса, и которое обычно выполняет функции коллектива, сделано выпуклым (рис. 2).

При этом расстояние между линзовым коллиматором и дифракционной решёткой увеличено, увеличивается также световой размер линзового коллиматора, но выходной зрачок смещается в плоскость холодной диафрагмы, а приёмник может быть поднят вверх для прижима к радиатору-холодильнику (рис. 3).

АБЕРРАЦИИ

Номенклатура сред для конструирования оптики, прозрачной в ИК-диапазоне, невелика. Кроме того, для удобства юстировки было принято решение использовать среды, прозрачные не только в ИК, но и в видимой области, что дополнительно сузило возможности выбора. Поэтому основной абберацией MIR является хроматизм

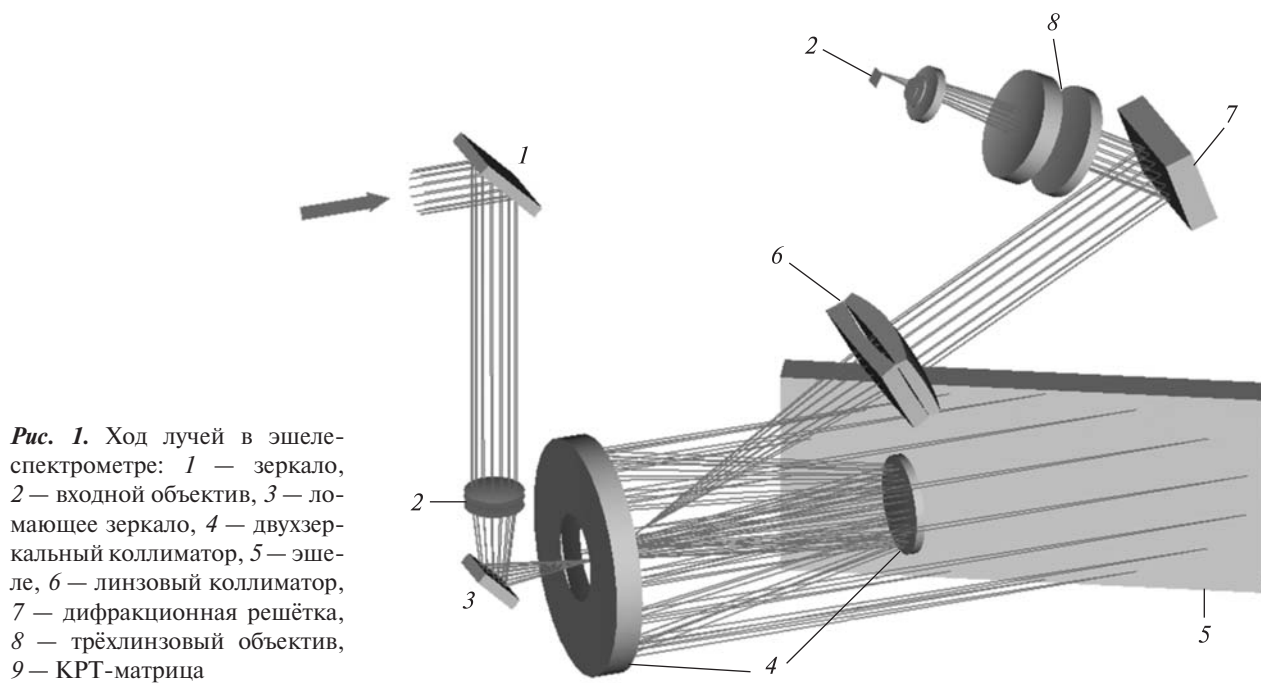


Рис. 1. Ход лучей в эшелле-спектрометре: 1 — зеркало, 2 — входной объектив, 3 — ло-
мающее зеркало, 4 — двухзер-
кальный коллиматор, 5 — эше-
лле, 6 — линзовый коллиматор,
7 — дифракционная решётка,
8 — трёхлинзовый объектив,
9 — КРТ-матрица

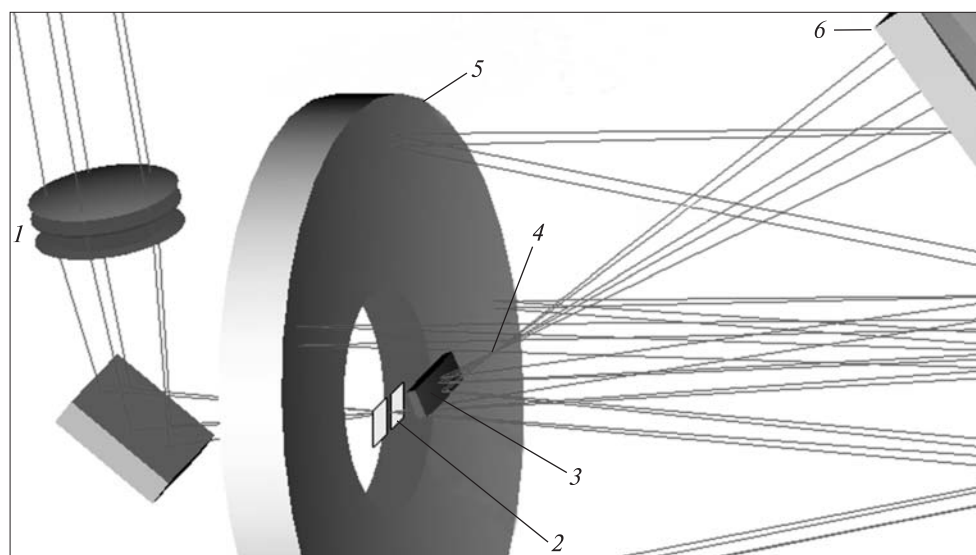


Рис. 2. Компоновка узла щели: 1 — вход-
ной объектив, 2 —
щель, 3 — наклонное
зеркало, 4 — про-
межуточный фокус,
5 — главное зеркало
зеркального колли-
матора, 6 — линзовый
коллиматор

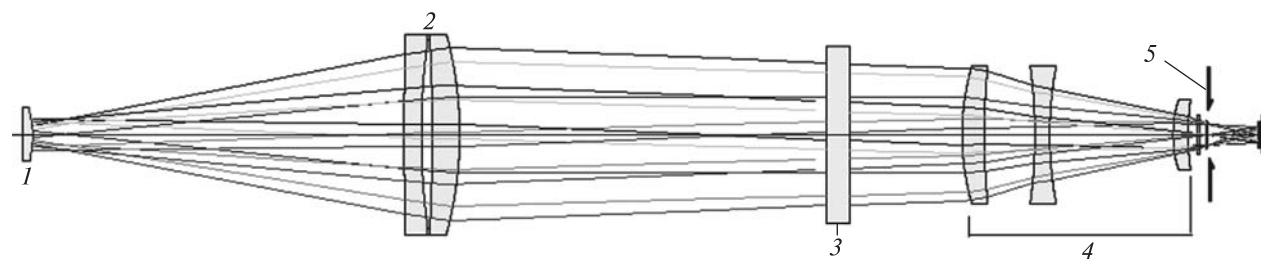


Рис. 3. Укладка выходного зрачка на холодную диафрагму (ход лучей условно развёрнут): 1 — наклонное зеркало, 2 —
линзовый коллиматор, 3 — дифракционная решётка, 4 — камерный объектив, 5 — холодная диафрагма

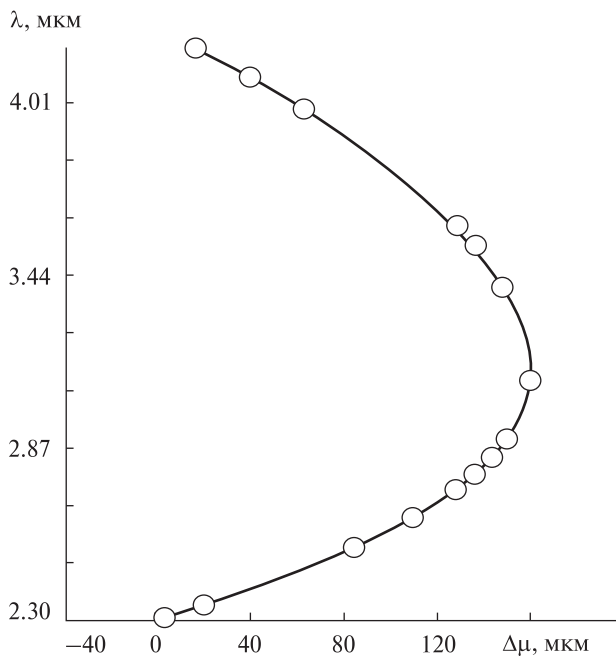


Рис. 4. Продольный хроматизм системы

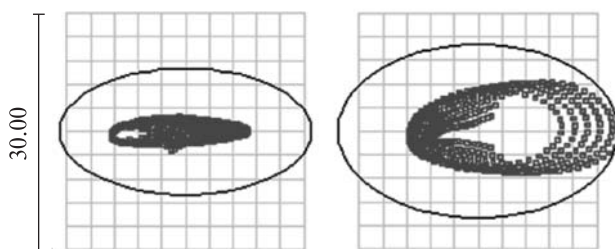


Рис. 5. Точечные диаграммы, вытянутые астигматизмом и анаморфозой

положения. На графике хроматической кривой (рис. 4) кружками показаны участки длин волн, включённые в расчёт. Поскольку хроматическая кривая плавная, то на остальных участках малый хроматизм обеспечивается автоматически.

Как известно, высокий показатель преломления способствует уменьшению петцвальной кривизны поля. Поэтому оказалось, что высокопреломляющие «флинтовые» линзы из селенида цинка выгодно делать положительными, а «кроновые» из флюорита — отрицательными. При этом общий баланс aberrаций благоприятнее, чем при классическом подходе. Следствием такого приёма явился обратный знак хро-

матической кривой в широком спектральном диапазоне.

Следующая по значимости aberrация — астигматизм. Но малый астигматизм оказывается даже благоприятным, так как увеличивает высоту спектральной линии несущественно, но за счёт ослабления требований к астигматизму можно «поджать» другие aberrации (например — остаточную кому). На рис. 5 показаны характерные точечные диаграммы системы (слева — в «синей» части диапазона, справа — в «красной»). Чёрные эллипсы — кружки Эйри, вытянутые анаморфозой дифракционной решётки.

АБЕРРАЦИИ И ДИФРАКЦИЯ

В целом качество изображения близко к дифракционному, что подтверждается рис. 6. Пока-

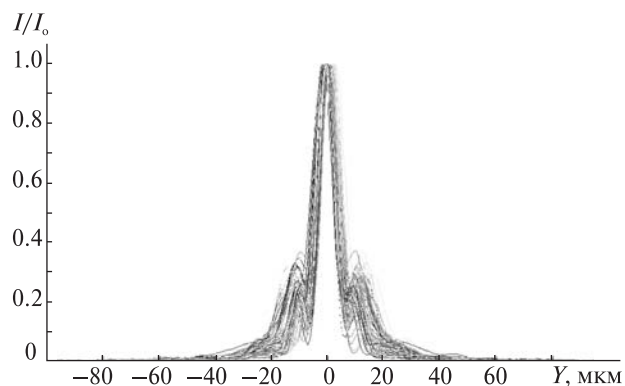


Рис. 6. Наложение сечений спектральных линий с наилучшим качеством изображения

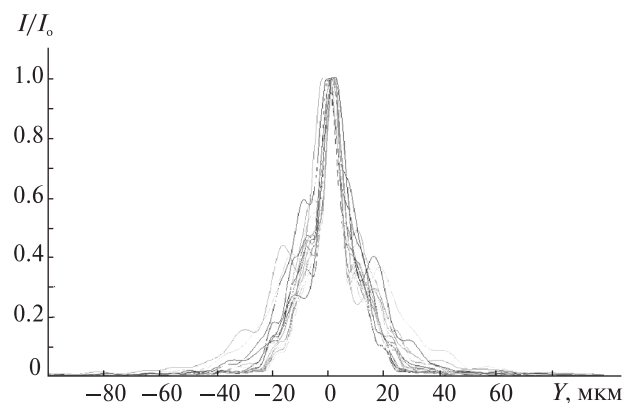


Рис. 7. Наложение сечений спектральных линий с худшим качеством изображения

зано около сотни сечений спектральных линий. Основной массив спектральных линий (более 90 %) дают сечения, близкие к дифракционным. Поэтому в первом приближении к ним применим критерий разрешения Рэлея. Из рисунка видно, что для разных длин волн координата первого минимума изменяется от 6 до 9 мкм.

Однако и для худших точек (менее 10 %) сечение характеризуется острым центральным пиком (рис. 7). Первый минимум практически замыт, но видно, что по уровню $1/e$ разрешение можно оценить величиной от 10 до 15 мкм.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная оптическая схема компактного эшелле-спектрометра MIR позволяет решить задачи анализа малых составляющих атмосферы Марса.

2. Предварительный анализ разрешающей способности MIR в целом подтверждает расчёты. Оптическая схема потенциально способна обеспечить разрешение порядка 50 000 элементов на спектр.

3. Показано, что в основном качество изображения близко к дифракционному, абберации существенны лишь для нескольких строк на самых краях спектрального диапазона.

4. Для повышения реального спектрального разрешения необходим субпиксельный анализ. Апостериорная обработка авторами не рассматривалась.

1. Korablev O., Montmessin F., Trokhimovsky A., et al. Compact echelle spectrometer for occultation sounding of the Martian atmosphere: design and performance // *Appl. Opt.* — 2013. — **52**. — P. 1054—106
2. Korablev O. I., Zakharov A. V., Zelenyi L. M., et al. Observations of the Martian atmosphere from Phobos Grunt Mission // *Mars atmosphere: Modelling and observation*. — 2011. — P. 469—472.
3. Smith M. D., Pearl J. C., Conrath B. J., Christensen P. R. Thermal emission spectrometer results: Mars atmospheric thermal structure and aerosol distribution // *J. Geophys. Res.* — 2001. — **106**, N E10. — P. 23929—23945.
4. Vandaale A. C., Daerden F., Drummond R., et al. NOMAD, a spectrometer suite for nadir and solar occultation observations on the ExoMars Trace Gas Orbiter // *Mars atmosphere: Modelling and observation*. — 2011. — P. 484—487.

5. Webster C. R., Mahaffy P. R., Atreya S. K., et al. Low upper limit to methane abundance on Mars // *Science*. — 2013. — **342**, N 6156. — P. 355—357.
6. Zurek R. W., Chicarro A., Allen M. A., et al. Assessment of a 2016 mission concept: The search for trace gases in the atmosphere of Mars // *Planet. and Space Sci.* — 2011. — **59**. — P. 284—291.

Стаття надійшла до редакції 06.02.15

Ю. С. Иванов, І. І. Синявський, М. Г. Сосонкін

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

ОПТИЧНА СХЕМА ЕШЕЛЛЕ-СПЕКТРОМЕТРА MIR ДЛЯ МІСІЇ ЕКЗОМАРС

Програмою ЕкзоМарс планується запуск орбітального зонда Trace Gas Orbiter (TGO) до Марса. Основним завданням TGO має стати комплексне вивчення атмосфери Марса, дослідження вертикального розподілу малих складових, метану, пошук органічних молекул (C_2H_2 , C_2H_6 і т. д.), інших малих складових, пошук можливих джерел і стоків, а також вимірювання ізотопних відношень та їхніх варіацій. Для вирішення цього завдання розроблений ешелле-спектрометр середнього ІЧ-діапазону MIR, що працює в режимі сонячних затемнень в діапазоні 2.2—4.4 мкм з роздільною здатністю до 50000. Описано оптичну схему і технічну реалізацію приладу.

Ключові слова: атмосфера Марса, ізотопний склад, спектрометр високої роздільної здатності

Yu. S. Ivanov, I. I. Syniavskiy, M. G. Sosonkin

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

OPTICAL SCHEME OF THE ECHELLE SPECTROMETER MIR FOR THE EXOMARS MISSION

The ExoMars program provides that the Trace Gas Orbiter (TGO) shall be launched to Mars. The main task is a comprehensive study of the Martian atmosphere and of the vertical distribution of trace gases and methane, in the search for organic molecules (C_2H_2 , C_2H_6 , etc.), the search for possible sources and sinks, as well as in the measurement of isotope ratios and their variations. To solve this problem, the echelle mid-IR spectrometer MIR was designed. MIR operates in the mode of solar eclipses in the range of 2.2—4.4 μ with a resolution of up to 50000. The optical layout and technical implementation of the instrument are described.

Key words: Martian atmosphere, isotopic composition, high resolution spectrometer.