

ЛОВЕЦ ЭКЗОПЛАНЕТ

18 апреля в 18:51:31 EDT (22:51:31 UTC) со стартового комплекса SLC-40 Станции ВВС США «Мыс Канаверал» стартовые расчеты компании SpaceX осуществили пуск FH Falcon 9 FT версии Block 4 с научным космическим аппаратом NASA – обсерваторией TESS для поиска экзопланет транзитным методом.

Старт и выведение прошли штатно. Спустя 49 мин 35 сек после старта обсерватория была успешно доставлена на высокоэллиптическую орбиту с приблизительными параметрами:

- наклонение – 28.7°;
- высота в перигее – 250 км;
- высота в апогее – 270000 км;
- период обращения – 6.25 сут.

В каталоге Стратегического командования США научному аппарату присвоили номер 43435 и международное обозначение 2018-038A.

История и цели проекта

Целью проекта TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) является обзор всего неба и массовый поиск планет у примерно 200 000 близких к Солнцу звезд, включая землеподобные планеты и объекты вдвое большего диаметра («суперземли»). Метод поиска – фотометрический: планеты обнаруживаются при прохождении по диску своей звезды, поскольку ее светимость в это время сокращается на величину закрытой планетой части света.

Инициатором создания обсерватории в 2004 г. стал Джордж Рикер (George R. Ricker) из Массачусеттского технологического института (MIT), который был тогда научным руководителем астрофизического проекта HETE (High Energy Transient Explorer). Под этим именем были последовательно запущены на FH Pegasus XL два созданных MIT совместно с компанией AeroAstro Inc. спут-

ника – HETE (4 ноября 1996 г., не отделился от 3-й ступени; НК №22-23, 1996) и HETE-2 (9 октября 2000 г.; НК №12, 2000). Последний успешно отработал семь лет, занимаясь обнаружением и локализацией гамма-всплесков с помощью приемников оптического и рентгеновского диапазона на ПЗС-матрицах.

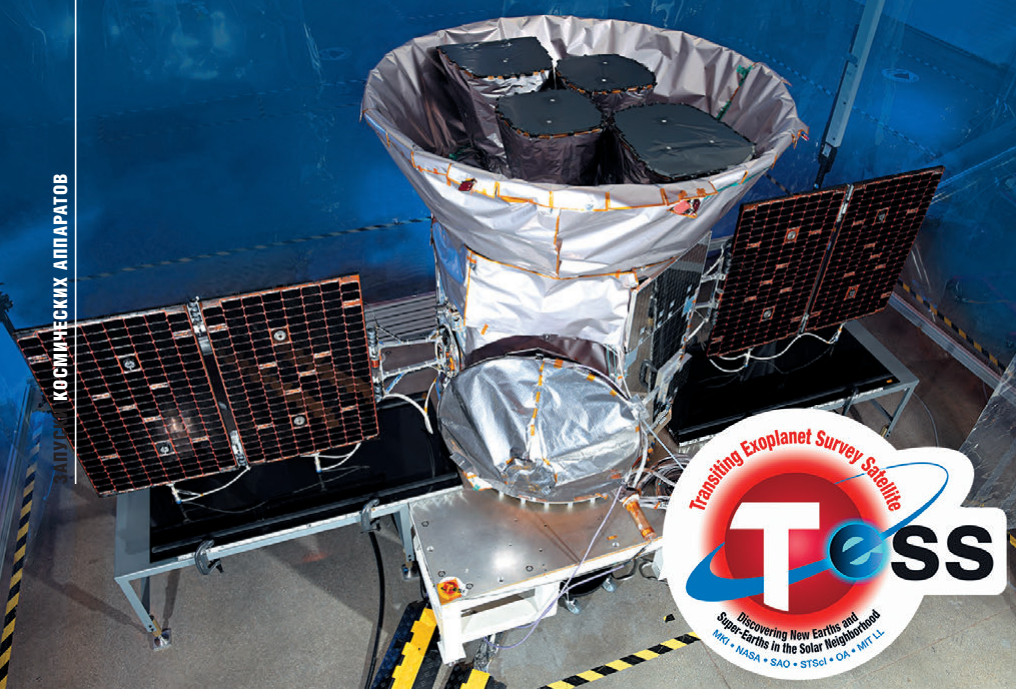
Работая с HETE-2, команда Рикера задавалась вопросом: можно ли с использованием подобных оптических камер обнаруживать экзопланеты? На тот момент это была «горячая» тема в области астрофизики: их было известно всего около 200 штук, причем большая часть была найдена путем измерения вариаций лучевых скоростей звезд, и лишь несколько – затменным (транзитным) методом, но последний обещал возможность нахождения маломассивных и удаленных от светила планет. Фотометрические камеры на HETE-2 сами не могли этого сделать, но, что называется, «идея понравилась».

В 2006 г. разработчики предложили проект поиска малых планет HETE-S, реализуемый на условиях частного финансирования, стоимостью около 20 млн \$. Поддержку ему обещал фонд Kavli Foundation; компания Google предоставила начальные средства, а MIT организовал приток частных инвесторов.

Стоимость проекта, однако, росла по мере увеличения интереса к нему, и в 2007 г. предложение переработали под возможное финансирование NASA в качестве одной из попутных научных миссий (Mission of Opportunity). В 2008 г. проект стоимостью 120 млн \$ с новым именем TESS представили космическому агентству на конкурс малых исследовательских аппаратов SMEX (Small Explorer), и в числе трех финалистов он получил деньги на фазу А разработки. Анализ, однако, выявил проблему: на низкой орбите магнитное поле Земли должно было нарушать ориентацию и мешать наблюдениям.

На второй этап команда Рикера не прошла, но, заручившись поддержкой компаний





Orbital Sciences и Aerospace Corp., в 2010 г. опять предложила TESS уже в качестве «обычного» (не малого) спутника-исследователя, и на этот раз на высокой орбите в резонансе 1:2 с Луной.

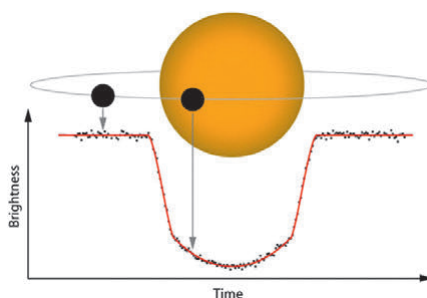
В сентябре 2012 г. NASA провело конкурс на создание исследовательских аппаратов в области астрофизики. Из четырех поступивших предложений в апреле 2013 г. были выбраны для реализации два: проект TESS и аппаратура NICER для изучения переменности рентгеновских источников, которую смонтировали на внешней поверхности МКС в июне 2017 г. (НК № 6, 2013; № 8, 2017).

В 2014 г. TESS успешно перешел с этапа формирования проекта на этап исполнения, в 2015 г. он миновал критическую защиту CDR (Critical Design Review) и в итоге был реализован в сроки, близкие к заявленным. Общая его стоимость составила 337 млн \$.

Следует отметить, что в 2009–2013 гг. NASA уже выполнило цикл транзитных наблюдений экзопланет на космической обсерватории Kepler (НК № 5, 2009). Она наблюдала одну фиксированную область небесной сферы площадью 115 квадратных градусов на границе созвездий Лебедя, Лиры и Дракона, содержащую около 150 000 звезд главной последовательности. За время работы по основной программе – до отказа двух из четырех маховиков системы ориентации – было найдено 4302 кандидата в экзопланеты, в основном у звезд на расстояниях от 300 до 3000 а.е., из которых «по горячим следам» удалось подтвердить 984, а к маю 2016 г. – еще 1284.

Принципиальное отличие проекта TESS состоит в глобальном охвате небесной сферы. За два года наблюдений будет отработано 85% общей площади неба – в 400 раз больше, чем у «Кеплера» и любого из предшествующих проектов.

Другое отличие от проекта Kepler состоит в отборе объектов изучения: примерно 200 000 звезд спектральных классов от F5 до M5, выбранных для высокочастотного мониторинга, существенно ближе к Солнцу (в основном 30–300 а.е.) и в среднем в 30–100 раз ярче. Это позволит впоследствии получить более точную информацию о параметрах их планет – массах, размерах, плотности и характеристиках атмосфер, деталях орбитальной динамики, наличии спутников и т.п.

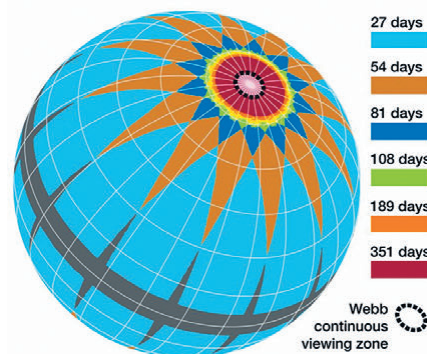


▲ Типовая кривая блеска звезды во время прохождения планеты по ее диску

Аппарат должен функционировать на орбите с периодом обращения 13,7 суток, или ровно половина сидерического месяца. Благодаря такому выбору, Луна не только не будет оказывать влияния на работу обсерватории, но и сможет «бесплатно» стабилизировать ее движение.

Стратегия наблюдений TESS строится следующим образом. На протяжении двух витков подряд обсерватория наблюдает одну область неба размером 24×96 кв. градусов, примерно противоположную направлению на Солнце. Первый год (13 циклов) обсерватория осматривает южное небо, второй год – северное. Блеск светил из основного списка проверяется с цикличностью в две минуты: для этого из общего поля зрения выделяются маленькие участки-марочки размером 10×10 элементов вокруг звезды и ведется накопление данных из 2-секундных экспозиций.

▼ Плотность покрытия небесной сферы наблюдениями TESS максимальна вблизи зоны постоянной видимости телескопа JWST



Состояние примерно 2 млн фоновых звезд блеском до 12^m будет фиксироваться раз в 30 минут; чаще не получится из-за ограниченной пропускной способности радиолитии. Данные записываются на борту и сбрасываются на Землю в течение 16 часов вблизи перигея каждого витка.

Разумеется, транзиты можно будет наблюдать лишь в тех системах, где направление на Солнце лежит вблизи плоскости планетных орбит. Понятно также, что значительная часть транзитов будет охарактеризована как однократные – их вызывают планеты с длительным периодом обращения. Благодаря тому, что зоны наблюдений пересекаются вблизи северного и южного полюсов эклиптики, по этим областям будет получена более подробная статистика, позволяющая найти меньшие по размеру планеты с более продолжительными периодами обращения. Полоса шириной ±6° от эклиптической плоскости наблюдаться не будет.

Как показывает моделирование, TESS сможет найти примерно 15 000 кандидатов в экзопланеты, в том числе примерно 1250 у основного «контингента» из 200 000 звезд, примерно 3200 у ярких карликов из числа фоновых светил и до 10 000 у более слабых звезд. До 4500 экзопланет из общего числа будут доступны для дальнейшего изучения. Ожидается, что примерно 250 экзопланет будут принадлежать к категории «земель» и «суперземель», и некоторая часть таких силикатных планет с водно-ледяной оболочкой окажется в пределах «зоны жизни» соответствующей звезды.

Экзопланеты различных классов, найденные TESS у близких ярких звезд, предполагается подтвердить и затем исследовать с использованием других космических и наземных средств, включая запускаемый в 2020 г. Космический телескоп имени Джеймса Вебба. На этом этапе предполагается изучить характеристики как самих планет, так и их атмосфер.

Масса является ключевым параметром наряду с радиусом, который вычисляется непосредственно из величины спада блеска звезды. Ученые рассчитывают определить массы по крайней мере 50 малых земледобных планет радиусом не более четырех земных, распределив их на земли и суперземли и так называемые мини-нептун, не имеющие твердой поверхности.

Помимо транзитных экзопланет, TESS сможет обнаружить астероиды, новые и сверхновые звезды, а также, возможно, оптические проявления источников гравитационных волн. Калиброванные данные TESS будут доступны всем желающим для самостоятельных поисков интересных объектов.

Спутник TESS

В кооперацию по созданию КА вошли более десятка университетов, исследовательских институтов и обсерваторий; из них основную роль играют следующие:

- ◆ Институт астрофизики и космических исследований имени Кавли и Лаборатория Линкольна при MIT – научное руководство, разработка бортового инструмента, научный центр и анализ данных;

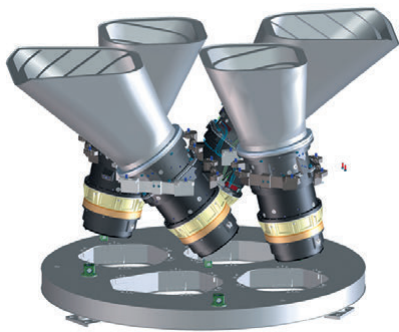
- ◆ Orbital ATK – разработка КА, интеграция с полезной нагрузкой, испытания, центр управления полетом;

- ◆ Исследовательский центр имени Эймса – система передачи данных;
- ◆ Центр космических полетов имени Годдарда – управление проектом, вопросы безопасности и качества, связь с общественностью;
- ◆ Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики – использование результатов наблюдений, научный центр;
- ◆ Научный институт Космического телескопа – управление архивом научных данных.

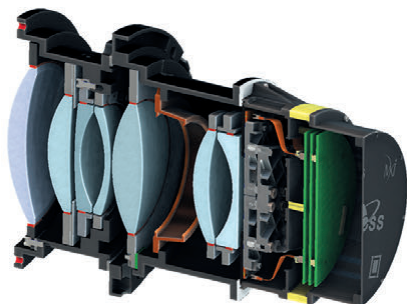
Спутник TESS стартовой массой 362 кг разработан и изготовлен компанией Orbital ATK в г. Даллес, штат Вирджиния, на базе платформы LEOStar-2. Корпус КА выполнен в виде шестиугольной призмы диаметром чуть более 1.0 м и высотой 0.85 м. На двух гранях корпуса установлены одноосные приводы солнечных батарей, на третьей – остронаправленная антенна. Наибольший размер TESS по солнечным батареям – 3.7 м. Сверху на служебный блок установлен модуль научной аппаратуры высотой 0.65 м и диаметром 1.2 м.

Две двухсекционные солнечные батареи площадью 0.89×1.10 м² каждая обеспечат КА мощностью 530 Вт в конце двухлетнего заявленного срока службы. Бортовые системы запитаны от шины напряжением 28 В, их среднее энергопотребление – 290 Вт.

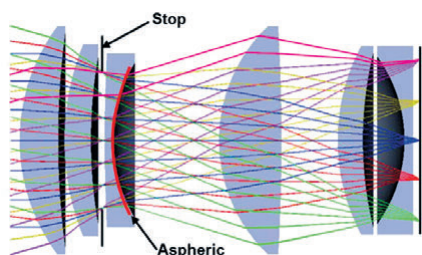
Система ориентации и стабилизации обеспечивает построение трехосной ориентации с нулевым моментом на четырех ЖРД по данным от четырех солнечных датчиков



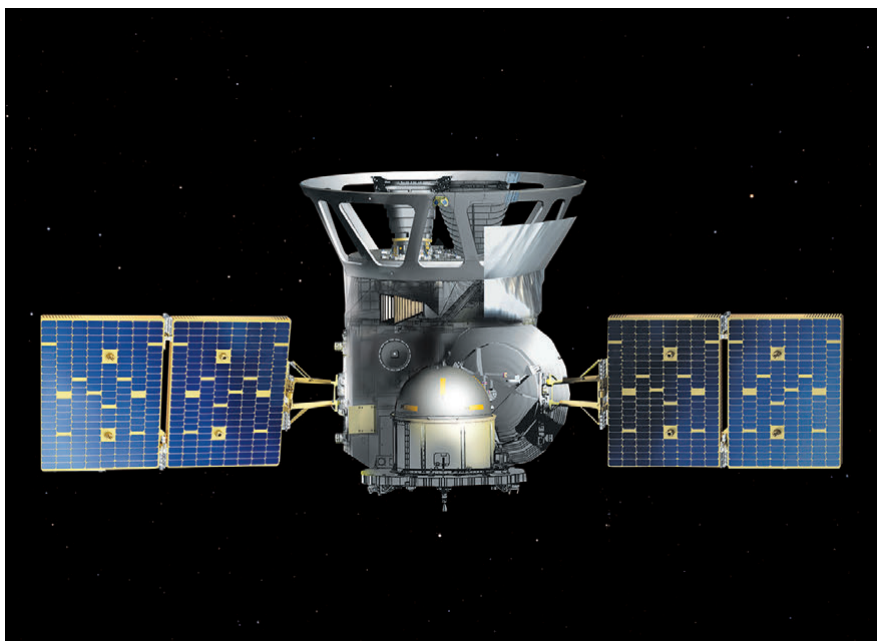
▲ Сборка из четырех телескопов TESS



▲ Конструкция телескопа-рефлектора



▲ Оптическая схема телескопа



и четырех гироскопов и точное наведение с помощью четырех маховиков компании Honeywell. В режиме точного наведения обеспечивается нацеливание с точностью 3.6" и стабилизация на уровне 0.05"/ч.

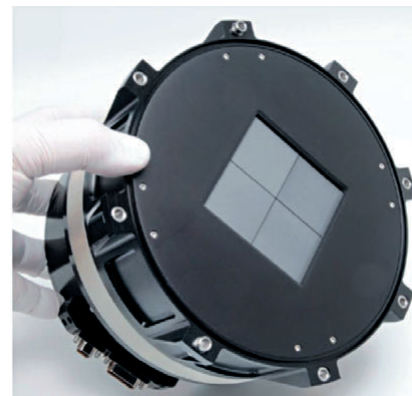
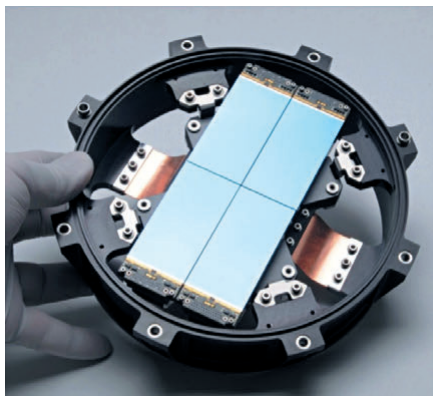
Текущую ориентацию КА определяет с использованием двойного звездного датчика датской фирмы DTU Space и корректирует по положениям примерно 200 навигационных звезд в зоне съемки основным прибором.

Бортовая ДУ однокомпонентная, на гидразине, включает бак емкостью 45 кг и пять ЖРД – один маршевый тягой 22 Н и четыре двигателя ориентации и стабилизации по 5 Н. Запас характеристической скорости бортовой ДУ составляет 268 м/с.

Единственный бортовой инструмент состоит из четырех широкоугольных телескопов-рефлекторов с фотоприемниками на базе ПЗС-матриц. Каждый телескоп с апертурой 105 мм и фокусным расстоянием 146 мм, состоящий из семи оптических элементов, имеет поле зрения 24×24°, а вся сборка отсматривает непрерывную полосу 24×96°. Аппаратура работает в диапазоне от 600 нм до 1000 нм, то есть в красном и ближнем инфракрасном участках спектра, что позволяет среди прочих объектов наблюдать сравнительно холодные красные карлики.

Приемные матрицы CCD-80 с низким энергопотреблением и малым уровнем

▼ Приемник фокальной плоскости одного из четырех телескопов TESS. Половина каждой матрицы находится под крышкой и служит для измерения темного тока (уровня помех)



шума подготовлены Лабораторией Линкольна на базе ПЗС-матриц проекта Chandra и ряда японских КА. Каждый телескоп использует четыре матрицы размером 2048×2048 элементов, формируя изображение размером 4096×4096 на площади 62×62 мм. Фотоприемники обеспечивают фотометрическую точность в 200 частей на миллион на часовом интервале наблюдений для звезды 10-й величины при систематических шумах на уровне менее 60 миллионных.

Сброс данных на Землю осуществляется по радиоканалам диапазонов S (1 Мбит/сек) или Ka (100 Мбит/сек) вблизи перигея орбиты, который, однако, будет достаточно высоким, чтобы КА не погружался в радиационные пояса.

Запуск и работа аппарата

Контракт на запуск TESS между NASA и компанией SpaceX на сумму 87 млн \$ был заключен в декабре 2014 г. До этого предполагалось использовать носитель воздушного базирования Pegasus XL, также эксплуатируемый компанией Orbital. Однако агентство, не объясняя причин, выбрало ракету Falcon 9 версии v1.1, хотя ее грузоподъемность была в несколько раз выше необходимой – как, стоит заметить, и цена. Впрочем, к лету 2015 г. ее пришлось заменить на еще более тяжелую версию v1.2, поскольку производство предыдущего варианта сворачивалось.



▲ Джефф Волосин, менеджер проекта TESS от Центра Годдарда

Изначально старт планировался на август 2017 г. За год до этого расчетная дата пуска сдвинулась с 9 августа на 20 декабря 2017 г., а в январе 2017 г. – на 20 марта 2018 г. из-за проблем с обеспечением графика пусков компании SpaceX. Эта новая дата оказалась надежной – она продержалась до середины февраля 2018 г., когда NASA объявило, что пуск состоится 16 апреля.

Ракету доставили на мыс Канаверал в середине марта, а спутник прошел выходной контроль 15 марта. 9 апреля состоялась первая «репетиция» старта, а 11 апреля – традиционный прожиг девяти ЖРД первой ступени на старте. 13 апреля маленький аппарат укрыли огромными створками обтекателя и провели смотр летной готовности, после

▼ Обсерватория TESS под обтекателем ракеты Falcon 9



которого пуск был назначен на 16 апреля в 18:32:07 EDT (22:32:07 UTC). Стартовое окно считалось мгновенным, но при необходимости (например, чтобы избежать столкновения с орбитальным объектом) время можно было сдвинуть вправо на 30 секунд.

В ночь на 16 апреля ракету вывезли на старт, однако менее чем за три часа до расчетного времени пуск отменили: возникли сомнения в нормальной работе системы навигации, наведения и управления GNC. На устранение проблемы выделили двое суток, и теперь старт был назначен на 18 апреля в 18:51:31 EDT. На этот раз не помешали ни техника, ни погода – и ракета ушла по графику.

Отделившись на 152-й секунде полета, первая ступень №B1045 совершила успешное приземление на автономную плавучую платформу Of Course I Still Love You (OCISLY). Ее предполагается использовать повторно при пуске грузового корабля Dragon к МКС.

Кроме того, SpaceX отработывала спасение головного обтекателя версии 2.0. В своем Instagram Илон Маск поместил фотографию створки, спускающейся под парашютом после входа в атмосферу. Подхват с помощью специального судна Mr Steven не планировался – такие эксперименты пока проводятся только при пусках «девятки» с базы Ванденберг, но парашютная система спасения была установлена и использовалась.

В результате первого включения вторая ступень вышла на 500-й секунде на опорную орбиту высотой около 250 км. Через 43 мин 10 сек после старта двигатель второй ступени включился во второй раз и за 53 секунды обеспечил набор необходимой скорости – примерно 10.4 км/с.

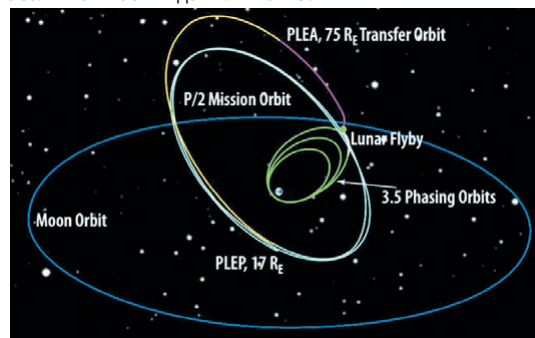
TESS отделился в 23:41:06 UTC; в 23:53 развернулись солнечные батареи КА. С борта через спутники TDRS и затем через австралийские станции Сети дальней связи была

получена телеметрия – и разработчики убедились в нормальном функционировании систем.

Тем временем вторая ступень РН выдала третий импульс, в результате которого приобрела гиперболическую относительно Земли скорость. По данным Джонатана МакДауэлла (США), в итоге она перешла на гелиоцентрическую орбиту размерами 0,82×1,00 а.е. и наклоном 0,3°.

На функциональные проверки аппарата отводилось пять суток. 20 апреля операторы компании Orbital ATK включили звездный датчик и построили грубую инерциальную ориентацию, а также опробовали ЖРД перед первой коррекцией орбиты. 21 апреля был проведен первый апогейный маневр А1М – двигатели включили на 50 секунд, главным образом, для проверки их работоспособности, тем не менее перигей орбиты поднялся примерно до 2200 км. 22 апреля прокалибровывали звездный датчик на фоне работы маховиков системы ориентации, а 23 апреля запустили бортовой алгоритм баллистического прогноза.

25 апреля в 05:42 UTC аппарат прошел перигей и начал второй виток. TESS выполнил первый перигейный маневр Р1М, после которого апогей орбиты достиг 354 000 км, а период обращения – 9 суток с небольшим. В тот же день были включены передатчик Ка-диапазона и усилитель на бегущей волне и протестирован канал высокоскоростной передачи информации от компьютера обработки данных ADHU.



▲ Траектория выхода TESS на рабочую орбиту

Второй апогейный маневр А2М не проводили – орбита КА была почти идеальной. 29 апреля были включены четыре научные камеры: до середины июня с перерывами на коррекции они будут собирать данные для калибровки. 30 апреля спутник перевели в режим точной стабилизации с генерацией кватернионов ориентации по данным от научного инструмента. Камеры стали охлаждаться до рабочей температуры -85°С.

4 мая TESS провел второй перигейный маневр Р2М. Включение двигателей на 7 сек задало условия для встречи с Луной. Третий маневр Р3М состоялся 13 мая; по уточненным данным, TESS должен пройти на расстоянии около 8000 км от Луны 17 мая в 06:34:35 UTC. Гравитационный маневр у Луны и еще одна коррекция 17 июня сформируют рабочую орбиту с перигеем 108 000 км, апогеем 376 000 км и периодом 13,7 сут.

Через 60 суток после старта TESS сможет начать научную вахту. Его работа профинансирована в течение трех лет, но при исправности бортовых систем может быть продлена до 20 лет и более. ■

Юрченко Владимир VSyurchenko@rambler.ru