

21 сентября от японского межпланетного зонда «Хаябуса-2» (はやぶさ2, Hayabusa 2) отделились первые два поверхностных зонда Minerva II (Rover-1A и Rover-1B). Они десантировались на поверхность малой планеты Рюгу (リュウグウ, 162173 Ryugu) и впервые в истории приступили к контактному изучению астероида.

Съемка с орбиты

Как мы помним, японский межпланетный зонд прибыл к астероиду Рюгу 27 июня 2018 г. (НК №8, 2018, с.65-66) и завис в «нулевой позиции» в 20 км от него со стороны Земли. Эта рабочая зона в проектной документации обозначалась Vox-A; помимо этого, выделялись также зоны Vox-B (на той же высоте, но со сдвигом в поперечных направлениях ± 10 км) и Vox-C (вниз до высоты 5 км).

Из зоны Vox-A «Хаябуса-2» продолжил дистанционные исследования поверхности астероида с помощью камеры оптической навигации ONC, лидара LIDAR, спектрометра ближнего ИК-диапазона NIRS3 и камеры теплового ИК-диапазона TIR.

10 июля Японское агентство аэрокосмических исследований JAXA опубликовало трехмерное видеоизображение Рюгу. Можно было видеть, что астероид диаметром около 900 м вращается справа налево, то есть его северный полюс находится ниже эклиптики, как у Венеры. Ось вращения оказалась наклонена на 172° , то есть стоит почти перпендикулярно к плоскости орбиты. Самый крупный кратер на Рюгу был диаметром около 200 м, самый большой камень – 130 м – украшал собой южный полюс.

30 июня с 09:02 до 16:45 UTC камера TIR снимала астероид каждые 8 минут с пространственным разрешением около 20 м, в итоге зафиксировав полный оборот Рюгу вокруг оси. Удалось проследить суточный ход температур и увидеть сезонные различия. Хотя наклон оси вращения Рюгу невелик, полюса освещены по-разному: в южном полушарии (верхнем на карте) сейчас стоит лето, а северном – зима. В «жарких» местах температура достигает $+100^\circ\text{C}$, а в холодных она ближе к комнатной. Заметим, что в момент съемки астероид находился в 0.987 а.е. от Солнца, то есть практически в таких же условиях, что и Земля.

Напомним, что одна из задач «Хаябуса-2» заключается в раскрытии тайн процесса формирования астероида. Ее можно решить путем изучения особенностей материала поверхностного слоя по распределению температур и по скорости их изменения. Еще одно предназначение камеры TIR – поиск таких мест для забора грунта, где присутствуют ценные, с научной точки зрения, частицы миллиметрового размера, а также уклонение от посадки в «напичканные» опасными валунами точки и в районы с суровыми температурными условиями.

Тем временем 6 июля был активирован германо-французский посадочный аппарат Mascot, и в 01:15 UTC специалисты Германского аэрокосмического центра в Кельне получили первые сигналы от него после прибытия к Рюгу.



Е. Рыжков., И. Лисов
«Новости космонавтики»

«Хаябуса-2»: десантная операция на астероиде

В результате тщательной проверки бортовых систем и инструментов операторы и разработчики признали аппарат готовым к посадке по согласованному с японскими специалистами графику.

19 июля JAXA провело пресс-конференцию, где представило первую топографическую карту Рюгу, результаты тепловых съемок и первые данные о составе поверхности. Было объявлено, что по спектру отраженного сигнала астероид не похож ни на один из известных метеоритов и что его очень темная поверхность (альbedo на уровне 0.02) может указывать на обилие углеродсодержащих материалов. Региональные различия оказались невелики. Довольно большая масса Рюгу (450 млн тонн) говорила о преимущественно силикатном составе и о возможности формирования из каменных обломков более крупного материнского тела.

Первое снижение

В этот же день агентство сообщило о начале операции по снижению «Хаябуса-2» до конца зоны Vox-C, то есть до высоты 5–7 км. Она началась 17 июля; спуск продолжался около четырех суток, затем аппарат около 10 часов вел наблюдения с минимальной высоты и к 25 июля вернулся на исходную позицию, чтобы передать информацию.

В ходе спуска 20 июля около 07:00 UTC с помощью оптической камеры ONC-T был сделан детальный снимок Рюгу с пространственным разрешением около 60 см – втрое

i Как мы помним, *хаябуса* – это японское название сокола-сапсана, хищной птицы из семейства соколиных (на латыни *Falco peregrinus*, по-английски *Peregrine falcon*). А в названии Рюгу заложена отсылка к герою старинной японской повести, который возвращал некую шкатулку (схожую операцию по доставке астероидного вещества проделает японский зонд). Иероглиф «рюю» имеет значение «жидкость»: предполагается, что в составе пород исследуемого астероида присутствует вода; другой иероглиф, который тоже читается «рюю», переводится как «дракон». Рюгу – это одно из названий двorca морского божества, появляющегося в текстах японских легенд. Это коррелирует с пояснениями JAXA о связи названия астероида с древними мифами.

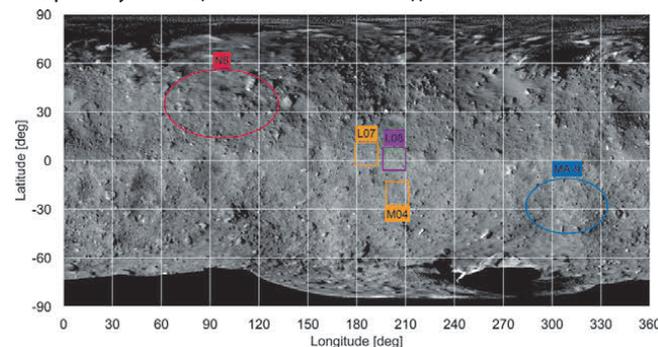
более высоким, чем с высоты 20 км. В центр изображения попал самый большой кратер астероида в форме чаши. Выяснилось также, что поверхность усыпана многочисленными обломками горных пород – валунами. Астероид Итокава, служивший целью для сбора образцов первой «Хаябусы», тоже обладал большим количеством валунов, но на Рюгу их, возможно, в разы больше.

Было также сделано 12 фотографий на протяжении полного оборота Рюгу – через 30° . Пара снимков под немного разными углами позволила построить стереоизображение этого участка астероида: его опубликовали 30 июля. Кстати, гитарист и астрофизик Брайан Мей вновь «поучаствовал в забеге»: 27 июля выпустил собственный стереопортрет Рюгу.

Спуск со съемкой

Вторая «экскурсия» вниз была предпринята 1–3 августа для наблюдений астероида со средней высоты. Она отличалась, во-первых, краткостью и, во-вторых, способом навигации. Если при июльском спуске аппарат отсчитывал свое положение от исходной точки на высоте 20 км, то теперь ориентировался по наземным контрольным точкам на поверх-

▼ Карта Рюгу с потенциальными местами посадки



ности Рюгу, как будет делать и при штатной посадке.

Спуск начался 1 августа в 01:38 UTC (по времени прихода сигнала ERT), его начальная скорость была 0.4 м/с. ИК-спектрометр NIRS3 работал все это время, широкоугольный канал ONC-W периодически давал навигационные снимки, а ONC-T и TIR начали работать от 7 км и ниже. Аппарат достиг заданной высоты 5 км в 11:32 UTC и перешел к зависанию в 14:35. «Хаябуса-2» провел в этом состоянии 8 часов, аккуратно выдерживая позицию и ориентируясь в надир. Команда на подъем была отправлена 1 августа в 22:30; на подъеме выше 7 км аппарат уже вел передачу данных на Землю. Возвращение на исходную высоту 20 км было зафиксировано 2 августа в 15:40 UTC. Эти и последующие операции обеспечивали японская наземная станция Усуда и американские под Мадридом и в Голдстоуне.

Гравитационная разведка

Третий спуск был проведен 6–7 августа с целью высокоточного измерения параметров гравитационного поля астероида. Для этого специалисты в максимально возможной степени отказались от маневрирования и использования системы ориентации, и КА, испытывая на своей искусственной «шкуре» гравитационное влияние Рюгу, сначала свободно падал, а затем поднимался по инерции.

Итак, 6 августа около 02:00 UTC аппарат начал снижаться с высоты 20 км с начальной скоростью 0.4 м/с и в 11:30 притормозил на высоте 6 км, снизив скорость до 0.085 м/с. С этой отметки «Хаябуса-2» перешел в состояние свободного падения. В 23:10 аппарат сблизился с астероидом до минимального расстояния – 851 м, включил ненадолго двигатели и пошел вверх на скорости 0.2 м/с до подъема на высоту 5000 м. 7 августа в 09:17 UTC аппарат выдал еще один импульс для завершения эксперимента, и 10 августа вернулся на исходную высоту.

Примечательно, что с расстояний 1250 м и 1000 м телескопическая камера ONC-T сняла участки астероида в деталях, и почти синхронно сработала широкоугольная камера ONC-W и сфотографировала Рюгу целиком. Красным выделены заснятые ONC-T области.

Планы составлены

17 августа JAXA провело большое совещание с участием экспертов DLR, CNES и NASA, на котором были выбраны места для спуска межпланетного зонда «Хаябуса-2» на поверхность Рюгу, а также точки-кандидаты для сброса европейского посадочного аппарата Mascot и двух японских роверов Minerva II. Результаты работы были оглашены на пресс-конференции 23 августа.

Возможные места искали и наносились на карту в низких (L), средних (M) и южных (N) широтах. Расчетный размер «полянки» для посадки «Хаябуса-2» составлял 100 м, она должна была быть ровной, без камней крупнее 50 см, которые могли бы повредить солнечные батареи или трубу грунтаборного устройства, с уклоном не более



▲ Область астероида с высоты 1250 м

30° и не слишком горячей – не более +97°. Это означало, что забор грунта мог проводиться лишь в пределах $\pm 30^\circ$ широты, то есть ± 200 метров от экватора.

После многочасовой дискуссии местом касания основного аппарата и забора грунта была названа точка L08 (запасные – L07 и M04), два японских зонда решили сбросить в зону N6, а европейский Mascot – в район MA-9.

Был также принят график проведения названных операций:

- ◆ 11–12 сентября – первая репетиция посадки «Хаябуса-2»;
- ◆ 21 сентября – сброс двух роверов Minerva II;
- ◆ 3 октября – сброс Mascot;
- ◆ середина октября – вторая репетиция посадки «Хаябуса-2»;
- ◆ конец октября – первая посадка «Хаябуса-2».

Тем временем с 18 августа по 7 сентября «Хаябуса-2» маневрировал и вел съемку астероида с различных позиций в пределах Вох-В. Максимальное боковое отклонение составило 9 км: 24 августа – по оси +Y, в сторону южного полюса Рюгу, 31 августа – по оси -X, на вечернюю сторону астероида.

Первая репетиция

Первая репетиция первой посадки получила обозначение TD1-R1. Планировалось снизиться над основной площадкой L08 до высоты 30–40 метров, определяя ее по лазерному высотометру LRF (Laser Range Finder), и, не совершая касания, выполнить подъем. Цель эксперимента состояла в проверке готовности к управлению зондом, съемке зоны посадки с очень близкого расстояния и проверке ее безопасности.

11 сентября в 06:46 UTC по времени прихода сигнала ERT (06:27 бортового времени) зонд начал спуск со скоростью 0.4 м/с. В 17:24 на высоте 5 км он замедлился и пошел к поверхности на 0.1 м/с. 12 сентября в 04:16 на отметке 600 м от поверхности сработала защита – зонд самостоятельно прекратил снижение и начал подниматься. Специалисты JAXA посчитали, что бортовой лазерный высотометр (лидар) утратил способность определять расстояние до Рюгу из-за малого альбедо астероида, а до LRF очередь еще не дошла. Решили уточнить настройки прибора перед следующей попыткой.

Во время спуска широкоугольная камера ONC-W производила навигационную съемку Рюгу. Последняя фотография была принята 12 сентября в 03:58 UTC с высоты 635 м. Светлое пятно в левой части астероида обязательно так называемому «опозиционному эффекту». Когда угол, образуемый Солнцем, поверхностью небесного тела и точкой наблюдения (фазовый угол), близится к нулю, наблюдается резкий рост яркости отраженного света. Ну а темное пятнышко в центре светлого пятна – это тень зонда «Хаябуса-2»!

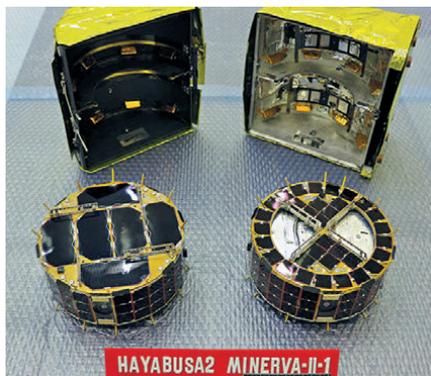
Японский десант на Рюгу

Minerva II* – это преемник зонда Minerva, который был на борту первой «Хаябусы». Как известно, этот японский КА предпринял 12 ноября 2005 г. сброс ровера Minerva на астероид Итокава, но операция прошла неудачно: десантный аппарат пролетел мимо и ушел в космос (HK № 1, 2006). Ровно через девять лет, 12 ноября 2014 г., с европейского КА Rosetta на ядро кометы Чурюмова–Герасименко был успешно сброшен зонд Philae, выполнивший лишь часть запланированных исследований из-за попадания в зону с неблагоприятным рельефом. Таким образом, в сентябре 2018 г. два японских ровера стали первыми подвижными исследовательскими зондами на астероиде.

На «Хаябусе-2» размещено три японских посадочных зонда в двух контейнерах – Minerva II 1 и Minerva II 2. В контейнере № 1 находятся два аппарата с обозначениями 1A и 1B, разработанные JAXA и предназначенные для сброса в сентябре. В контейнер № 2 был заложен зонд иной конструкции от университетского консорциума во главе с Университетом Тохоку. Его планируется сбросить на поверхность в 2019 г.

JAXA именуует зонды роверами, хотя они должны не ездить по поверхности, а перемещаться прыжками длиной до 15 м с помощью специального механизма, приводимого в действие двумя моторами постоянного тока. Аппараты 1A и 1B имеют форму плоского цилиндра высотой 70 мм и диаметром 180 мм, их массы – 1151 г и 1129 г соответственно. На первом установлены четыре камеры, на втором – три, они предназначены для стереосъемки поверхности астероида. «Шип»,

* Имеет расшифровку Micro Nano Experimental Robot Vehicle for Asteroid, II Generation.



выступающий за край корпуса, – это датчик температуры. На роверах также размещены датчик света (фотодиод), акселерометр, измеритель температуры, гироскоп и прочие приборы.

Зонды должны «ориентироваться на местности» и в зависимости от местных условий строить свой маршрут на поверхности. Все десантные аппараты (три японских и европейский) имеют связь с «Хаябусой-2» через транспондер ОМЕ-Е, принимающий данные на скорости до 32 кбит/сек. Далее информация передается на Землю через основную систему связи «Хаябусы-2».

Операция по отделению и сбросу роверов из контейнера Minerva II 1 началась 19 сентября. «Хаябуса-2» начала привычный уже спуск 20 сентября в 05:26 UTC ERT (05:08 бортового времени). В 15:51 на высоте 5 км скорость спуска снизили до 0.1 м/с. 21 сентября в 03:25 на высоте 300 м аппарат перешел в автономный режим работы и к 04:17 спустился до 100 метров.

21 сентября в 04:24 (04:06 бортового времени) на высоте 55 м при горизонтальном перемещении «Хаябусы-2» был выполнен сброс зондов 1А и 1В. В 06:30 пришло



▲ Снимок поверхности с зонда Minerva 1В

подтверждение связи с ними и подъема основного аппарата со скоростью 0.5 м/с до высоты 2.5 км. 22 сентября к 06:00 UTC «Хаябуса-2» вернулся на высоту 20 км.

Сразу после отделения зонд 1А сфотографировал «Хаябусу-2» и Рюгу, однако изображение получилось размытым из-за вращения. Аппарат 1В тоже запечатлел Рюгу, причем расплывчатое изображение в левой части снимка получилось благодаря попаданию солнечных лучей в кадр. Основной КА, в свою очередь, отслеживал движение зондов над поверхностью.

Зонды достигли поверхности астероида в целостности и сохранности (об этом свиде-

* Имеется расшифровка: Mobile Asteroid Surface Scout.

тельствовало, в частности, падение зарядного тока солнечных батарей в расчетный момент попадания в тень) и начали отправлять информацию и фотоснимки. 22 сентября поступило наглядное подтверждение, что по крайней мере один ровер успешно «скачет» по астероиду – от зонда 1А поступил цветной снимок в полете над Рюгу. На следующий день аналогичные снимки удалось получить от объекта 1В. К 27 сентября аппарат 1А смог сделать девять прыжков, а 1В – четыре.

На снимках с поверхности не удалось увидеть никаких признаков реголита – одни лишь камни разных размеров.

Mascot идет по следу

2 октября в 03:10 UTC (02:50 бортового времени) началось шестое по счету снижение «Хаябусы», на этот раз с целью сброса франко-германского зонда Mascot.

Зонд массой 9.8 кг выполнен в виде параллелепипеда размерами 275×290×195 мм. Бортовая аппаратура запитывалась от литиевого аккумулятора, рассчитанного на 16 часов работы, то есть чуть более двух суток на Рюгу. Поворотный рычаг из вольфрама служил для перемещения аппарата в прыжке длиной до 70 м. Mascot* имел на борту четыре научных прибора: теплорадиометр MARA, широкоугольную камеру MASCAM, спектроскопический микроскоп MicrOmega и магнитометр MASMAG.

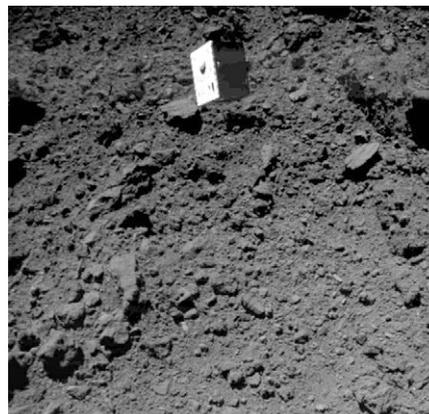
В точке посадки ожидалась температуры от -63°C ночью до +47°C днем. По соседству с зоной MA-9 имелись камни размером до 30 м, но сама она была довольно ровной. Съемка позволяла предполагать сравнительно свежий материал, мало затронутый космической радиацией, то есть древнее вещество в не слишком измененном состоянии. Недаром это место получило неформальное название «Страна чудес».

Снижение шло по той же базовой схеме. Отметку 5 км «Хаябуса-2» прошел в 13:45, будущее место своей посадки отснял с разрешением 0.20 м в 20:41, к автономной работе приступил в 01:20.

3 октября в 02:17 UTC ERT (01:57:20 бортового времени) на высоте 51 м европейский зонд отделился от «Хаябусы-2» со скоростью 0.04 м/с. Отделение засняла камера ONC-W материнского аппарата. Связь с ним была установлена сразу; уже на спуске Mascot вел измерения магнитометром и теплорадиометром и сделал 20 снимков камерой MASCAM.

Примерно через 6 минут после отделения зонд коснулся поверхности Рюгу в районе 30° ю.ш., 300° в.д., подпрыгнул и летел еще 11 минут до второго касания. Лишь в 02:34 бортового времени, после еще примерно восьмью прыжков, Mascot успокоился и начал измерения на поверхности.

«Хаябуса-2» уже к 06:47 поднялся до высоты 3 км и провисел там более суток, обеспечивая работу Mascot и снимая его перемещения. Увы, анализ переданных данных в Кёльне показал, что зонд лежит неудачно. В 07:20 на «Хаябусу» и затем на борт была передана и спустя 18 минут исполнена команда на перемещение. К 08:30 операторы узнали, что теперь Mascot находится в правильном положении и работает как ожидалось, но... больше не видели его на поверхности.



▲ Зонд Mascot идет на посадку

Отработав полный суточный цикл, в 16:29 опять же по команде с Земли аппарат успешно выполнил малое перемещение, которое сделало положение датчиков еще более благоприятным для измерений.

Последний подскок был заказан в 18:04 на исходе расчетного ресурса батарей, и после него Mascot проработал еще час, а в общей сложности – не менее 17 час 07 мин. Последний сигнал с него был принят «Хаябусой-2» в 19:04 UTC, когда материнский аппарат зашел за горизонт относительно точки нахождения зонда. Через полчаса после этого менеджер проекта зонда д-р Тра-Ми Хо (Tra-Mi Ho, Институт космических систем DLR) объявила об успешном завершении эксперимента.

Теплорадиометр MARA показал, что материал поверхности довольно рыхлый, но самый важный вывод Mascot был таким же, как и после посадки японских зондов: много камней разных размеров и форм, но практически полностью отсутствует тонкая фракция, или реголит. Что же тогда сможет взять с поверхности основной КА?

«Хаябуса-2» должен был вернуться на 20-километровую отметку 5 октября, однако к берегам Японии приблизился тайфун, и операторы задержали возвращение до 8 октября.

Планы меняются

14 октября JAXA сообщило, что по итогам первых исследований поверхности посадка «Хаябусы-2» в конце октября не состоится и будет осуществлена в январе 2019 г. или позже.

Проблема оказалась в том, что в каждом из трех потенциальных районов посадки найдены опасные камни размером 50 см и более, а свободные от них места немногочисленны и малы. В зоне L08 удалось найти ровный участок L08-B размером около 20 метров, но хватит ли точности навигации, чтобы в него попасть? При сбросе первых поверхностных зондов с высоты около 50 м была практически подтверждена возможность наведения с точностью до 10 м, чего как будто должно хватить.

14–15 октября была выполнена вторая репетиция посадки с обозначением TD1-R1-A в область L-08 как раз с целью проверки точности навигации на высоте ниже 50 м. Минимальная высота была достигнута 15 октября в 13:44 UTC – всего 22.3 м! На 24–25 октября назначена третья репетиция TD1-R3.

С 20 ноября по 31 декабря «Хаябуса-2» будет находиться в соединении с Солнцем, что означает отсутствие связи с Землей. ■