

## «Мессенджер» изучает Меркурий

В.И. АНАНЬЕВА  
ИКИ РАН

---

К началу XXI в. Меркурий оставался одной из самых неизученных планет Солнечной системы. После пролетов в 1974–1975 г. АМС «Маринер-10» около ближайшей к нашему светилу планеты к ней не приближался ни один космический аппарат. Меркурий до сих пор таит множество загадок. Для того, чтобы их разгадать, в августе



2004 г. была запущена американская АМС «Мессенджер», в 2011 г. ставшая первым искусственным спутником Меркурия. В течение четырех лет «Мессенджер» открыл, что Меркурий имеет необычное строение, он прошел сложную геологическую историю и проявляет активность, которая не завершилась и по сей день.

### О ПЛАНЕТЕ МЕРКУРИЙ

Ближайшая к Солнцу планета Солнечной системы Меркурий известна людям с глубокой древности. Из-за большой скорости перемещения по небесной сфере ее посвятили быстроногому Гермаону (Гермесу) – древнегреческому богу торговли – покровителю атлетов и путешественников. Римляне отождествляли Гермеса со своим богом торговли

и вестником богов Меркурием.

Наблюдать Меркурий трудно из-за малых размеров и близости к Солнцу. Любители астрономии могли наблюдать 7 мая 2003 г. и 8 ноября 2006 г. редкое астрономическое явление – транзиты Меркурия по диску Солнца – даже в бинокль; ближайшие прохождения состоятся 9 мая 2016 г., 11 ноября 2019 г. и 13 ноября 2032 г. Планета не удаляется от дневного светила более, чем

на 28,3°, а ее угловой диаметр меняется от 4,5" до 13". Удобнее всего наблюдать Меркурий в низких широтах в моменты западной или восточной элонгации, когда он удаляется от Солнца на максимальное угловое расстояние. Из-за вытянутости орбиты Меркурия это расстояние может меняться от 18° до 28,3°.

Меркурий обращается вокруг Солнца по эллиптической орбите с большой полуосью –



*Меркурий. Снимок получен 29 сентября 2009 г. АМС «Мессенджер» во время третьего пролета около Меркурия (разрешение – 5 км). Фото NASA.*

0,3871 а.е. (57,91 млн км) и эксцентриситетом 0,2056; делает один оборот за 87,969 земных суток. Расстояние между планетой и Солнцем меняется от 0,3075 а.е. в перигелии до 0,4667 а.е. – в афелии, то есть в 1,5 раза. Долгое время считалось, что период вращения Меркурия равен орбитальному и что Меркурий все время повернут к Солнцу только одной стороной, как Луна к Земле. Лишь

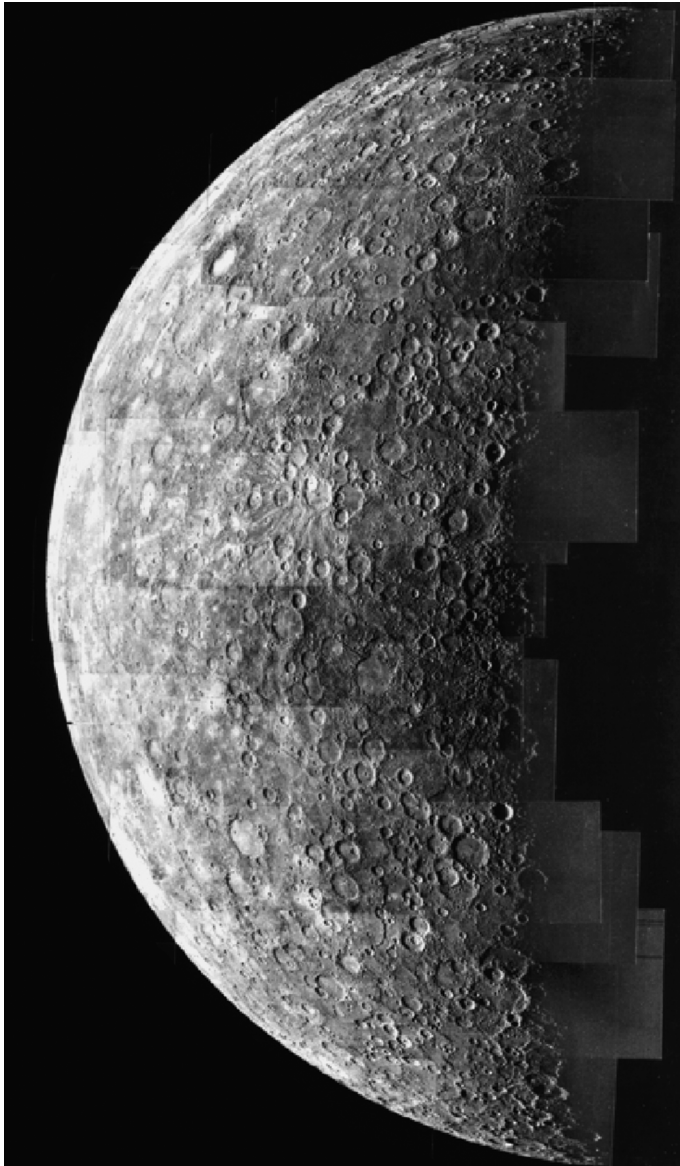
в 1960-х гг. выяснилось, что это не так. Радиолокационные наблюдения Меркурия показали, что один оборот вокруг своей оси планета делает за 58,646 земных суток (или 2/3 меркурианского года). Таким образом, солнечные сутки на Меркурии делятся 175,97 земных суток, что составляет два

меркурианских года, или трое звездных суток.

Первая планета Солнечной системы – не только ближайшая к Солнцу, но и самая маленькая. Радиус Меркурия составляет всего 2439,7 км – это меньше, чем радиус крупнейшего спутника Юпитера Ганимеда (2634 км). Масса



*АМС «Маринер-10». Рисунок NASA.*



*Меркурий. Мозаика, составленная из 18 снимков АМС «Маринер-10», сделанных во время первого пролета у Меркурия 29 марта 1974 г. за 6 ч до момента максимального сближения. Разрешение снимков – около 2 км. Кратер со светлым дном, окруженный кольцом темного материала у верхнего левого края диска планеты, – 160-км кратер Лермонтова. Фото NASA.*

Меркурия равна  $3,301 \times 10^{23}$  кг (0,055  $M_{\text{З}}$ , или 4,49  $M_{\text{Л}}$ ). Его средняя плотность достигает  $5,427 \text{ г/см}^3$  (или 98,4% от средней плотности Земли). Такая высокая для небольшой планеты средняя плотность означает, что в составе Меркурия велика доля же-

леза, а каменных пород сравнительно немного.

До середины 1970-х гг. Меркурий оставался загадочным и совершенно неизведанным миром. Первый запуск к нему состоялся в ноябре 1973 г. Американская АМС «Маринер-10» предназначалась для изуче-

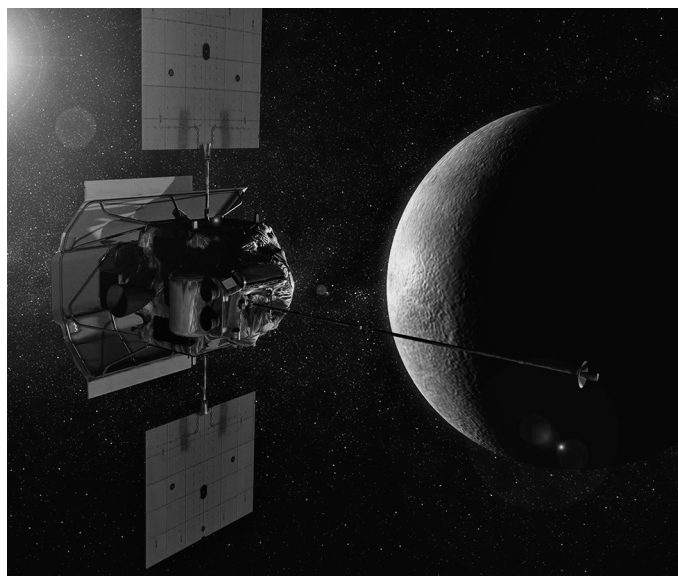
ния Венеры и Меркурия с пролетной траектории полета (Земля и Вселенная, 1975, № 2, с. 36–37; 1975, № 5, с. 73; 1976, № 1). 29 марта 1974 г. «Маринер-10» впервые пролетел мимо Меркурия на расстоянии 703 км. Глазам ученых предстала планета, больше всего напоминающая Луну – лишенная атмосферы, обильно усыпанная ударными кратерами. Из-за соразмерности между орбитальными периодами Меркурия и «Маринера-10» последний пролетел мимо планеты еще два раза – 21 сентября 1974 г. на расстоянии 48 тыс. км и 16 марта 1975 г. – в 327 км. По снимкам, полученным станцией, была составлена карта почти 45% поверхности Меркурия. Кроме ударных кратеров, «Маринер-10» обнаружил на его поверхности систему протяженных уступов – эскарпов, – образовавшихся в результате глобального сжа-

АМС «Мессенджер» на орбите вокруг Меркурия в представлении художника. Рисунок NASA, Университет Джона Хопкинса.

тия планеты. Аппарату также удалось измерить магнитное поле, которое оказалось примерно в сто раз слабее земного. После этого более чем на 30 лет Меркурий снова остался «в одиночестве».

#### УСТРОЙСТВО АМС «МЕССЕНДЖЕР»

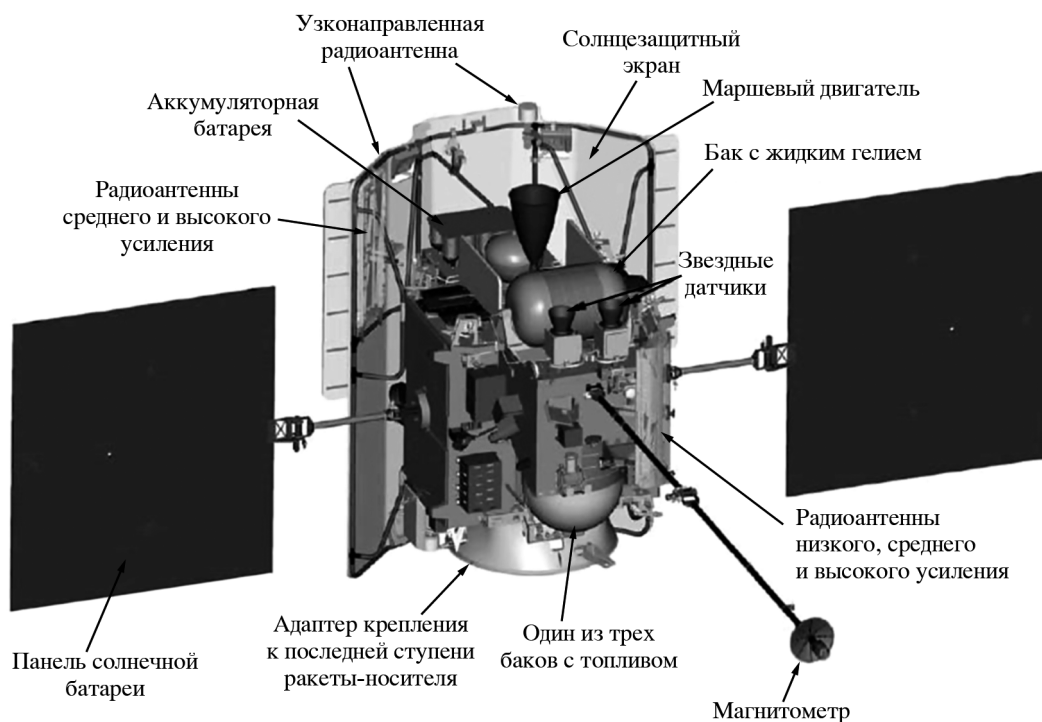
Результаты исследования Меркурия с помощью АМС «Маринер-10» дали больше вопросов, чем ответов. Остались неотснятыми чуть менее 60% поверхности Меркурия, по-прежнему оставался неизвестным состав поверхности, внутреннее строение планеты и ее эволюция. В чем причина столь высокой плотности Меркурия? Велика ли доля летучих в его коре? Есть ли на полюсах планеты залежи водяного льда? Продолжается ли тектоническая активность, или она угасла миллиарды лет назад? Какова структура магнитного поля и как магнитосфера взаимодействует с солнечным ветром? Для того, чтобы ответить на эти вопросы, нужен был новый космический аппарат – причем такой,



чтобы исследовал планету не с пролетной траектории, а с орбиты искусственного спутника.

Американская АМС «Мессенджер» («Messenger» – посланник; MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry and Ranging – поверхность, космическое окружение, геохимия и зондирование Меркурия) была спроектирована специально для работы в жестких условиях космического пространства в окрестностях этой планеты. Так, например, мощность солнечного излучения на орбите Меркурия вблизи перигелия в 10,6 раза выше, чем на орбите Земли. Стартовая масса АМС «Мессенджер» достигала 1100 кг, из них почти 600 кг из них приходилось на топливо (Земля и Вселенная, 2004, № 6, с. 108; 2005,

№ 2, с. 64–66; 2008, № 3, с. 107; 2009, № 2, с. 86–88; 2010, № 2, с. 25–27; 2011, № 4, с. 33–34; 2012, № 2, с. 41; 2015, № 1, с. 44–45). Корпус аппарата размерами  $1,42 \times 1,85 \times 1,27$  м был изготовлен из углепластика; обращенная к Солнцу сторона АМС прикрывалась солнцезащитным экраном размером  $2,5 \times 2$  м; корпус укутан в многослойную теплоизоляцию, для отвода тепла использовались радиаторы и тепловые трубки. Источником энергии для станции служили две односторонние поворотные панели солнечных батарей размером  $1,5 \times 1,65$  м, фотоэлектрические преобразователи изготовлены на основе арсенида галлия,  $2/3$  площади панелей занимали небольшие зеркала, которые отражали большую часть



солнечных лучей и не давали панелям перегреваться. На этапе межпланетного перелета солнечные батареи вырабатывали 385–485 Вт электроэнергии, на орбите Меркурия – 640 Вт. Для обеспечения работоспособности станции в те моменты, когда он входил в тень Меркурия, была предусмотрена аккумуляторная водородно-никелевая батарея емкостью 23 А·ч.

Двигательная установка станции включала в себя двухкомпонентный маршевый двигатель с тягой 68 кгс для основных маневров и 16 малых однокомпонентных жидких реактивных двигателей для небольших коррекций. Горючее (гидразин) и окисли-

тель (тетраоксид азота) хранились в трех титановых баках диаметром 56 см и длиной 104 см; находившийся под высоким давлением гелий обеспечивал их подачу в двигателя.

В систему связи «Мессенджера» входили две фазированные антенные решетки высокого усиления, две веерные антенны среднего усиления и четыре антенны низкого усиления. Для надежности все радиоантенны были закреплены неподвижно. Передачу данных с аппарата на Землю обеспечивал 11-ваттный радиопередатчик, работавший в X-диапазоне; скорость передачи данных менялась от 9,9 бит/с до 104 кбит/с; команды на космический аппарат

*Размещение бортовых систем и научной аппаратуры на АМС «Мессенджер». Вид со стороны двигательного отсека. Рисунок NASA.*

с Земли шли со скоростью от 7,8 до 500 бит/с.

«Мозгом» аппарата стали два модуля интегрированной электроники IEM (основной и резервный), каждый из которых включал в себя радиационно стойкий процессор RAD6000 с тактовой частотой 25 МГц и аналогичный процессор для защиты от сбоев с тактовой частотой 10 МГц. В состав каждого IEM также входило твердотельное запоминающее устройство с памятью

до 1 Гбайт. Многократное дублирование систем и применение радиационно стойкой электроники позволило «Мессенджеру» выдержать высокий уровень радиации в окрестностях Меркурия и успешно функцио-

нировать в течение четырех запланированных сроков.

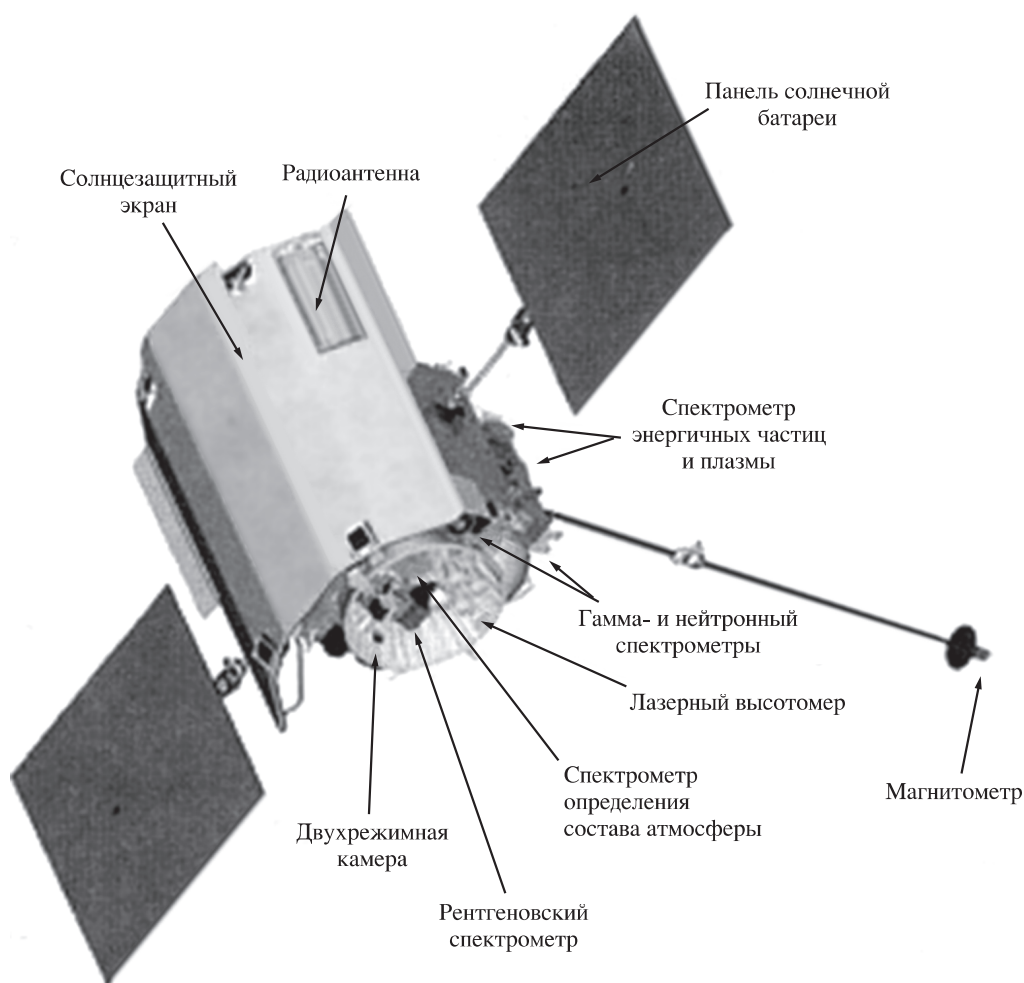
#### НАУЧНЫЕ ПРИБОРЫ «МЕССЕНДЖЕРА»

Для всестороннего изучения ближайшей к Солнцу планеты на борту «Мессенджера» находилось семь научных приборов массой 42,5 кг.

**Двухрежимная система построения изображений MDIS** включала в себя широкоугольную

и узкоугольную камеры для детальной съемки поверхности Меркурия. Широкоугольная камера с полем зрения  $10,5 \times 10,5^\circ$  и чувствительностью 295–1040 нм (от ближнего УФ-диапазона до ближнего ИК-диапазона) была снабжена 11 светофильтрами, пропускающими лучи с разной длиной волны. Узкоугольная камера имела поле зрения  $1,5 \times 1,5^\circ$  и получала с высоты 200 км черно-белые снимки с

*Размещение бортовых систем и научной аппаратуры на АМС «Мессенджер». Вид со стороны солнцезащитного экрана. Рисунок NASA.*



разрешением до 130 м. В рамках расширенной миссии (когда «Мессенджер» пролетал на малой высоте над поверхностью Меркурия) разрешение некоторых снимков достигало 4–7 м на пиксель.

**Спектрометр нейтронов и гамма-лучей GRNS** регистрировал нейтроны и гамма-лучи от ядер атомов на поверхности Меркурия, испускаемые ими под действием космических лучей, а также при естественном излучении радиоактивных элементов. Инструмент определил содержание в коре Меркурия водорода, магния, кремния, кислорода, железа, титана, натрия и кальция.

**Спектрометр рентгеновских лучей XRS** исследовал элементный состав самого верхнего (толщиной 1 мм) слоя поверхности Меркурия. Инструмент фиксировал рентгеновское излучение в диапазоне 1–10 кэВ, где расположены линии магния, алюминия, кремния, серы, кальция, титана и железа. Один из детекторов инструмента фиксировал рентгеновское излучение Солнца.

**Магнитометр MAG** предназначался для изучения магнитного поля Меркурия, его структуры и динамики; прибор был вынесен на 3,6-м штанге – для того, чтобы замеры не искажались под воздействием собствен-

ного магнитного поля космического аппарата.

**Лазерный альтиметр MLA** измерял высоты рельефа поверхности для построения точной топографической карты Меркурия. Прибор испускал импульсы лазерного излучения с длиной волны 1064 нм и определял расстояние до выбранной точки, измеряя время возврата отражения каждого посланного импульса. На расстоянии 1500 км от Меркурия точность определения высот на его поверхности составила 30 см.

**Спектрометр для изучения атмосферы и поверхностных пород MASCS** включал в себя спектрометр ультрафиолетового и видимого диапазонов для изучения состава эфемерной атмосферы Меркурия (пространственное разрешение на лимбе планеты – 25 км) и спектрограф видимого и инфракрасного диапазонов для поиска на поверхности планеты силикатных пород, богатых железом и титаном (оливинов, пироксенов и ильменита). Наилучшее пространственное разрешение инфракрасного спектрографа – 3 км.

**Спектрометр плазмы и энергичных частиц EPPS** измерял распределения заряженных частиц в магнитосфере Меркурия по энергиям и элементному составу; состоял из двух отдельных приборов – спектрометра

энергичных частиц EPS и высокоскоростного спектрометра плазмы FIPS.

Кроме того, фиксируя на Земле доплеровский сдвиг частоты радиосигналов, приходящих от «Мессенджера», исследователи могли очень точно измерять его лучевую скорость. Это, в свою очередь, помогло с высокой точностью изучить гравитационное поле планеты и показать, что в ее недрах находится крупное жидкое ядро.

ПОЛЕТ «МЕССЕНДЖЕРА»

Близость Меркурия к Земле приводит к неверному выводу, что к нему можно быстро добраться. Однако это сложнее сделать, чем долететь до Плутона. Для того, чтобы приблизиться к меркурианской орбите, АМС должна погасить значительную часть орбитальной скорости Земли – 30 км/с. Этого мало – падая к Солнцу в его поле притяжения, она наберет значительную скорость, которую тоже надо будет погасить, чтобы выйти на орбиту вокруг Меркурия. В настоящее время ни один космический аппарат не способен на прямой перелет к Меркурию, поэтому применялась сложная траектория полета, включающая в себя многочисленные гравитационные маневры.

На пути к Меркурию АМС «Мессенджер» при-

шлось изрядно «петлять» по внутренней части Солнечной системы. Станция стартовала 3 августа 2004 г. с космодрома ВВС США на мысе Канаверал с помощью РН «Дельта-2». Через год, 2 августа 2005 г., «Мессенджер» вернулся к Земле, пролетев мимо нее на расстоянии 2347 км и отдав ей часть своей орбитальной скорости. Первый гравитационный маневр в поле притяжения Венеры состоялся 24 октября 2006 г.; тогда аппарат пролетел от нее в 2992 км; во время второго – 5 июня 2007 г. – в 338 км. Каждый пролет около планет понижал перигей и апогей орбиты станции, понемногу приближая ее к Солнцу. Наконец настала очередь гравитационных маневров в поле притяжения Меркурия. Первый раз «Мессенджер» пролетел мимо Меркурия 14 января 2008 г., сблизившись с ним до расстояния 203 км, второй раз – 6 октября 2008 г. (до 200 км), в третий раз – 30 сентября 2009 г. (до 228 км). 18 марта 2011 г. станция на 15 мин включила маршевые двигатели на торможение и вышла на высокоэллиптическую орбиту вокруг Меркурия высотой в перигентре 200 км, в апоцентре – 66 тыс. км. Во время этого маневра был потрачен 31% запаса топлива, имевшегося на борту; приращение скорости за счет работы

двигателей составило 861,6 м/с. Полет к Меркурию занял 6,5 лет – всего на три года меньше, чем полет к Плутону АМС «Новые Горизонты» (Земля и Вселенная, 2006, № 3, с. 108–109; 2015, № 6, с. 94–98; 2016, № 1, с. 16–20). За это время «Мессенджер» преодолел 7,9 млрд км и сделал 15 витков вокруг Солнца.

#### ОРБИТА ВОКРУГ МЕРКУРИЯ

Орбита, на которой оказался земной «посланник», проходила над терминатором планеты (границей между дневным и ночным полушариями) и отличалась высоким эксцентриситетом. В перигентре «Мессенджер» приближался к Меркурию на расстояние 207 км, в апоцентре – удалялся до 15 тыс. км. Наклонение орбиты к экватору планеты составило 82,5°, орбитальный период – 12 ч. В дальнейшем орбита «Мессенджера» эволюционировала как под действием приливных сил Солнца, так и в результате регулярных коррекций траектории, проводимых операторами миссии и обеспечивающих ученым наилучшие условия для проведения исследований. В первые два года работы возмущение орбиты со стороны Солнца приводило к увеличению высоты перигентра АМС; регулярные коррекции – напротив – уменьшали

ее вновь до 200 км. Точка максимального сближения находилась на 60° с.ш.

Основная программа исследований АМС «Мессенджер» была рассчитана на двое меркурианских солнечных суток (примерно на один земной год). Вначале планировалось, что она завершит работу 17 марта 2012 г. Однако станция продолжала находиться в прекрасном техническом состоянии, научные приборы приносили новые результаты, поэтому время функционирования «Мессенджера» увеличили. В дальнейшем его работу продлевали еще несколько раз.

В апреле 2012 г. «Мессенджер» перешел на 8-часовую орбиту вокруг Меркурия. Находясь на этой орбите, станция приближалась к Меркурию на 278 км в перигентре и удалялась на 10 314 км в апоцентре; наклонение орбиты к экватору планеты составило 84°. Переход на новую орбиту позволил «Мессенджеру» пролетать над северной околополярной областью Меркурия, где, как предполагалось, в глубоких полярных кратерах, скрытые от прямых солнечных лучей вечной тенью, находятся залежи водяного льда.

В 2013 г. взаимное расположение Меркурия, Солнца и орбиты «Мессенджера» стало таково, что приливные силы



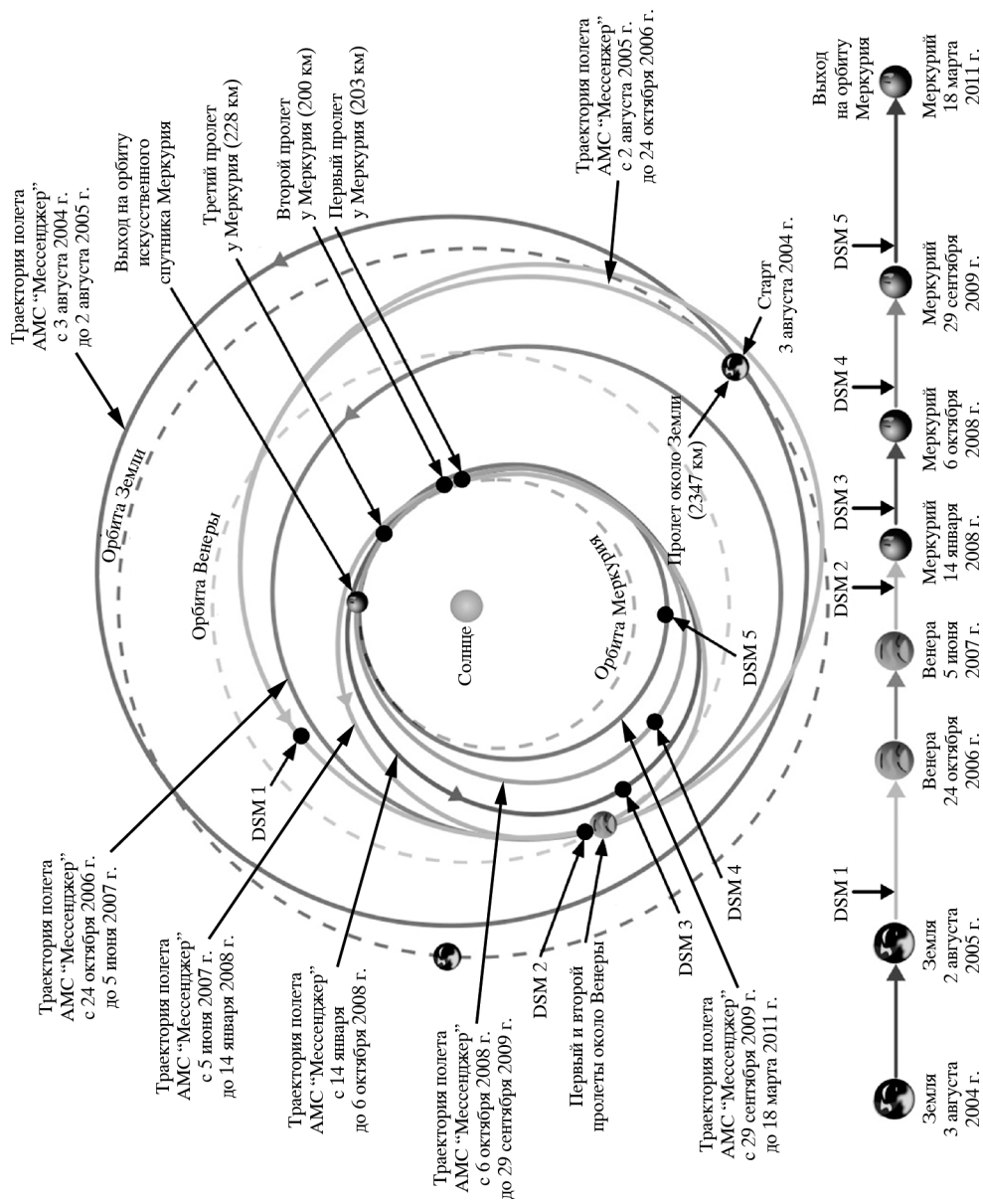
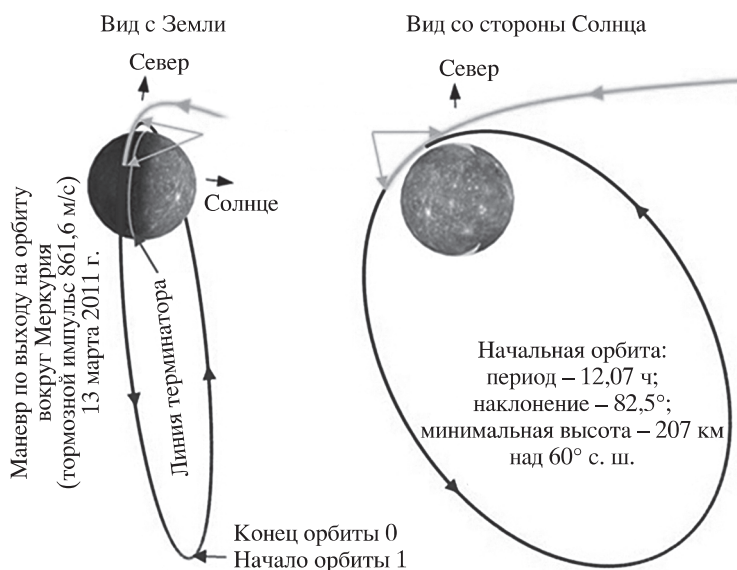


Схема траектории полета АМС «Мессенджер» на пути к Меркурию.

Траектория «Мессенджера» сразу после выхода на орбиту вокруг Меркурия. Слева – первый оборот станции вокруг Меркурия при взгляде со стороны Земли, справа – он же со стороны Солнца. Показан первый виток по эллиптической орбите вокруг планеты. Вверху линией показана траектория «Мессенджера» на подлете к Меркурию, часть орбиты – его траектория во время работы двигателей на торможение.



со стороны Солнца стали «понижать» высоту перицентра орбиты земного «посланника». 20 апреля 2014 г. станция пролетела над планетой на высоте 199 км – ближе, чем когда-либо ранее. К середине июня 2014 г. высота перицентра понизилась до 114 км. Теперь коррекции траектории не понижали, а повышали высоту перицентра. Однако законы небесной механики неумолимы – к 25 июля 2014 г. минимальная высота пролета «Мессенджера» над поверхностью Меркурия уменьшилась до 100 км.

Запасы топлива на борту станции стремительно «таяли»: истратив топливо, станция теряла возможность маневрировать и «поднимать» высоту своей орбиты. По расчетам баллистиков, в конце марта 2015 г. «Мессенджер» должен был

упасть на поверхность Меркурия. Однако в реальности это произошло на месяц позже – 30 апреля 2015 г. Операторы миссии продлили жизнь своему аппарату, используя для последних маневров сжатый гелий, служивший для наддува двигателей. Выпуская гелий через сопла малых реактивных двигателей, они получили необходимый импульс еще для нескольких небольших коррекций. Наконец 30 апреля 2015 г. в 19 ч 26 мин 01 с по Гринвичу, завершив 4104-й виток вокруг Меркурия, станция врезалась в поверхность планеты со скоростью 3,91 км/с. В результате падения образовался ударный кратер диаметром около 15 м. Таким образом, «Мессенджер» проработал на орбите вокруг Меркурия 4,1 земных года – вчетверо

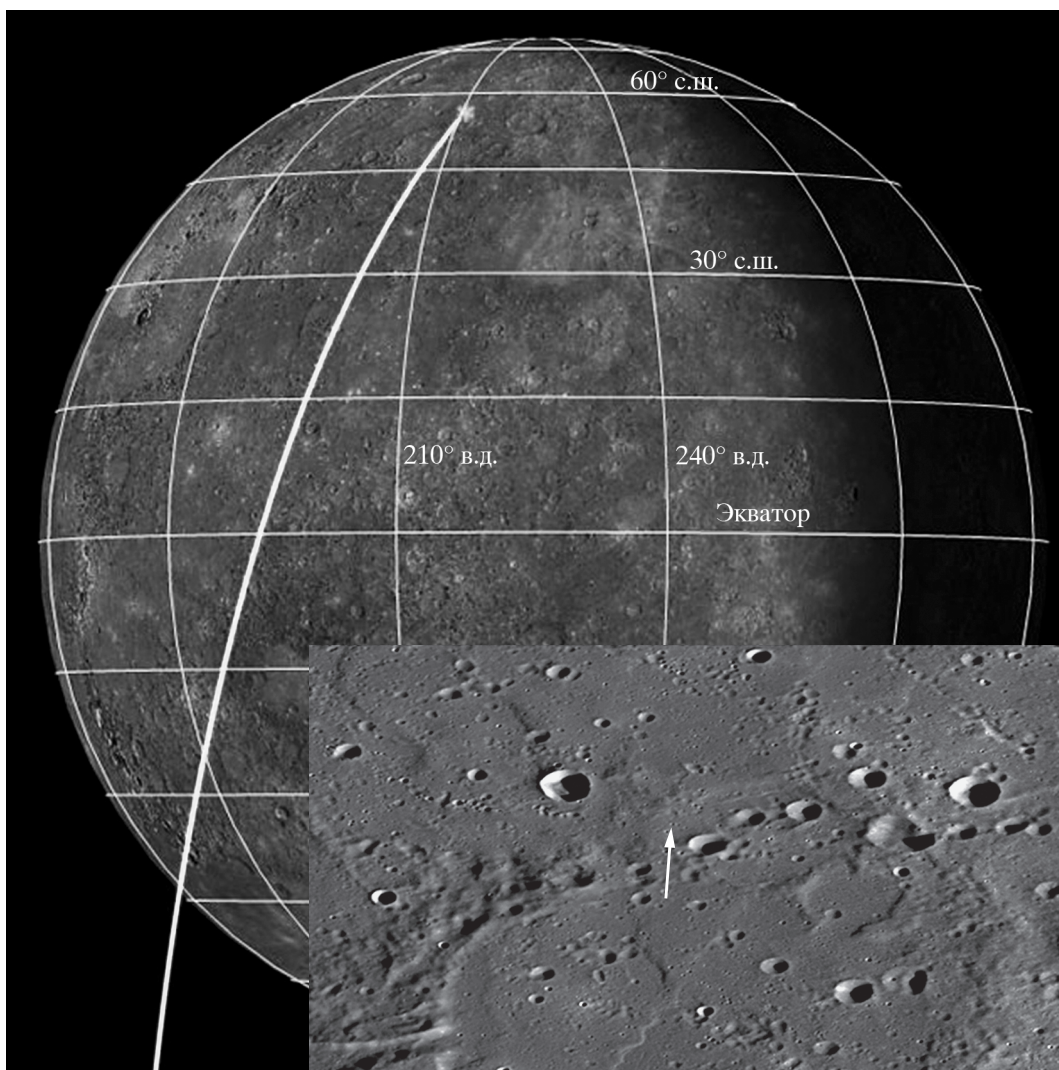
дольше, чем планировалось.

#### ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГРАММЫ

Что же удалось сделать земному «посланнику», ставшему первым искусственным спутником первой планеты Солнечной системы?

#### Съемка поверхности

Во-первых, «Мессенджер» провел картографирование поверхности Меркурия: уже к концу 2012 г. съемкой была «охвачена» вся поверхность планеты. На основе полученных снимков была составлена глобальная монохромная карта поверхности Меркурия с разрешением 250 м, а также карта его северной околополярной области – с разрешением 166 м. Кроме того, была построена цветная



карта поверхности планеты с разрешением 1,2 км. Говоря более точно, эту карту следовало бы назвать многоцветной (или мультиспектральной) – она объединила в себе снимки, сделанные в лучах с длиной волны в 430, 480, 560, 630, 750, 830, 900 и в 1000 нм. Для сравнения: обычное цветное изображение формата RGB формиру-

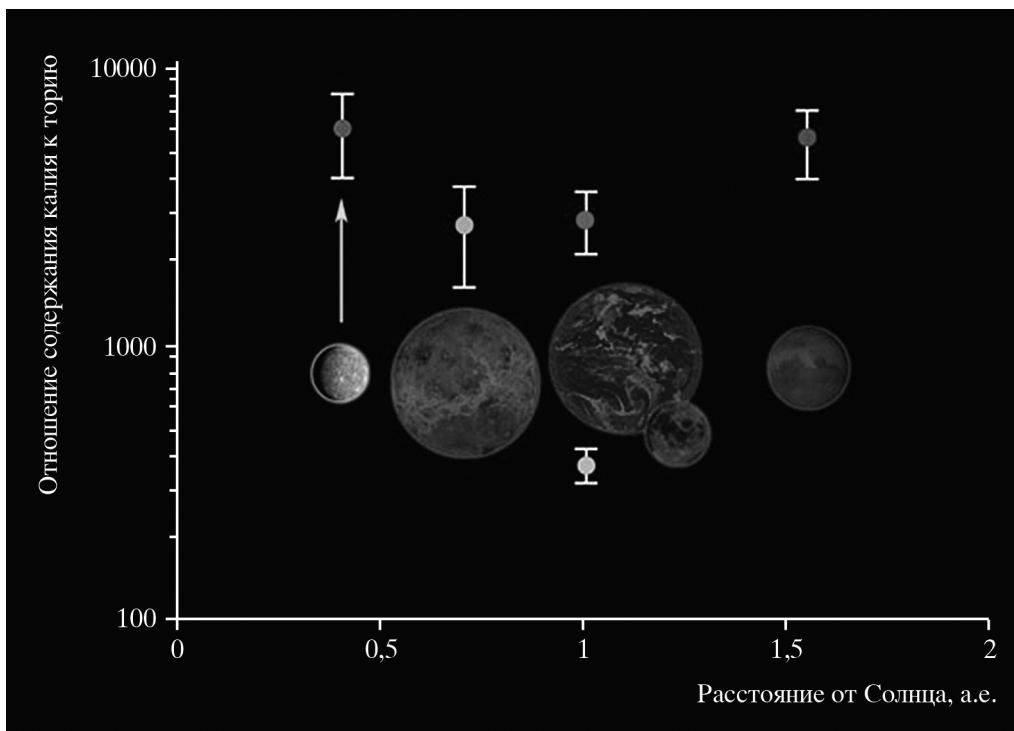
ется путем наложения всего трех каналов – синего, зеленого и красного. Карты опубликованы NASA в марте 2013 г. на сайте миссии «Мессенджер», все они доступны для скачивания.

#### Определение химического состава

Во-вторых, по данным «Мессенджера», Меркурий оказался го-

*Траектория падения АМС «Мессенджер» на поверхность Меркурия. Во врезке – стрелкой обозначено место падения вблизи кратера Яначек, координаты – 54,44° с.ш. и 210,12° в.д.*

раздо богаче, чем считалось ранее, летучими элементами, что разом зачеркнуло «катастрофические» гипотезы его

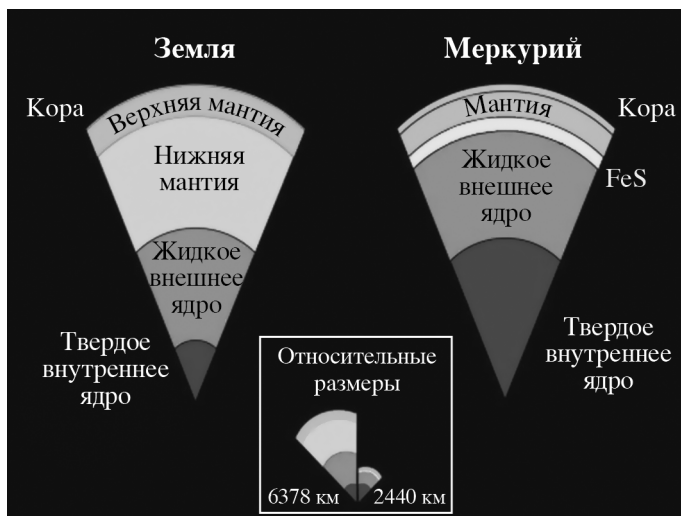


*Отношение содержания калия и тория на планетах земной группы и на Луне. Высокое отношение K/Tr на Меркурии исключает «катастрофические» гипотезы его формирования.*

формирования. Спектрометр нейтронов и гамма-лучей GRNS обнаружил в коре Меркурия значительное количество калия, натрия, серы и хлора – элементов, испаряющихся даже при умеренном нагреве. Отношение содержания калия к торью (K/Tr) оказалось близким к аналогичной величине для других планет земной группы и значительно большим, чем для Луны, сформировав-

шейся (как в настоящее время считается) в результате колоссального столкновения протоземли с Тейей. Особенно велико содержание калия в высоких широтах северного полушария Меркурия. Неожиданным оказалось относительно высокое содержание в коре Меркурия серы (1–4%) и низкое – железа (1–2%). Кроме того, исследователи обнаружили крупномасштабные вариации в содержании различных элементов: более светлые гладкие вулканические равнины оказались богаче алюминием, натрием и калием и беднее – магнием, кальцием и серой (относительно более тем-

ных и древних областей). Колоссальный ударный бассейн Калорис (море Жары) оказался значительно обедненным магнием и обогащенным алюминием. Ученые предполагают, что после мощного астероидного удара дно бассейна было залито лавой не из вещества коры, а из мантии Меркурия. В целом значительные вариации химического состава лав, изливавшихся на поверхность Меркурия, объясняются сложной геологической историей планеты. Кроме того, летучие элементы натрия и калий могут испаряться из грунта наиболее жарких областей, переноситься к полюсам – туда,



Модель внутреннего строения Меркурия (справа) в сравнении с Землей (слева). Показано внутреннее твердое ядро, выше – жидкое внешнее ядро, мантия и кора. Между жидким внешним ядром и твердой мантией на Меркурии лежит слой твердого сульфида железа FeS. Во врезке – относительные размеры и внутреннее строение Земли и Меркурия.

где прохладнее, и откладываться там.

#### Внутреннее строение и глобальное сжатие

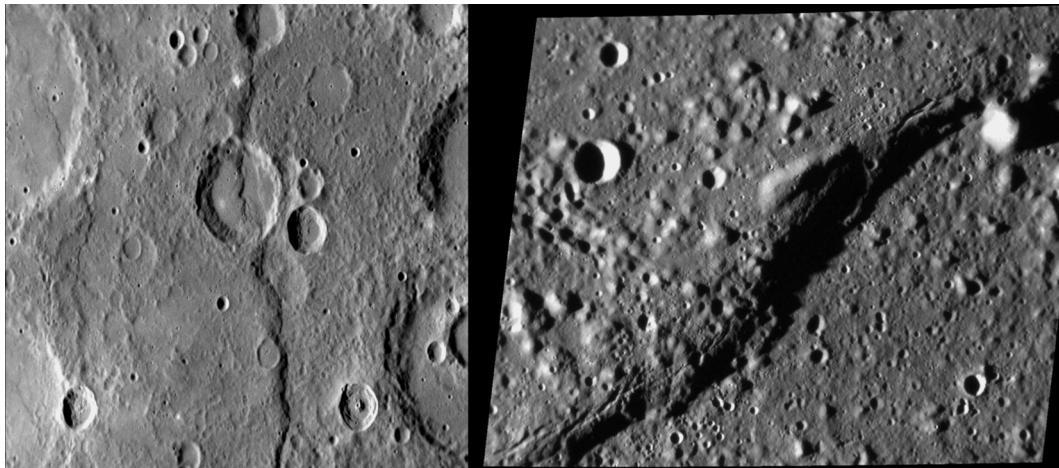
В-третьих, точное измерение лучевой скорости «Мессенджера» в разных точках его траектории позволило с высокой точностью измерить гравитационное поле Меркурия: безразмерный момент инерции первой планеты Солнечной системы оказался равным  $0,353 \pm 0,017$  (для сравнения: безразмерный момент инерции однородной сферы равен 0,4; этот параметр для Земли равен 0,3315). Также была измерена амплитуда либраций Меркурия – она достигает  $38,5 \pm 1,6$  угловых секунд, или 450 м на экваторе. Это позволило определить внутреннее строение планеты. Как оказалось, толщина твердой внешней оболочки Меркурия

(туда входят кора, силикатная мантия и слой сульфида железа) составляет всего  $410 \pm 37$  км, все остальное ( $2020 \pm 30$  км) представляет собой огромное частично расплавленное железное ядро! Таким образом, ядро занимает примерно 83% планеты (по радиусу).

Постепенное остывание жидкого железного ядра привело к глобальному сжатию Меркурия. Еще на снимках «Маринера-10» были замечены протяженные обрывистые уступы, получившие название эскарпов. Крупные эскарпы тянутся на сотни километров; и получили собственные имена, но есть и более мелкие. Анализ рисунка эскарпов показал, что с момента окончания поздней тяжелой бомбардировки (3,8 млрд лет назад) из-за глобального сжатия радиус Меркурия уменьшился на 7 км!

#### Отложения водяного льда

Еще одним важнейшим результатом стало открытие на дне северных околополярных кратеров Меркурия (куда никогда не попадают прямые солнечные лучи) значительных отложений водяного льда. Три независимых наблюдения подтверждают этот вывод: во-первых, нейтронный спектрометр «Мессенджера» обнаружил в грунте северной околополярной области Меркурия избыток атомов водорода. Во-вторых, спектры вещества на дне глубоких околополярных кратеров в ближнем инфракрасном диапазоне «продемонстрировали» присутствие водяного льда. Проведено детальное моделирование температуры поверхности и подповерхностных слоев Меркурия с использованием данных о реальном рельефе местности.

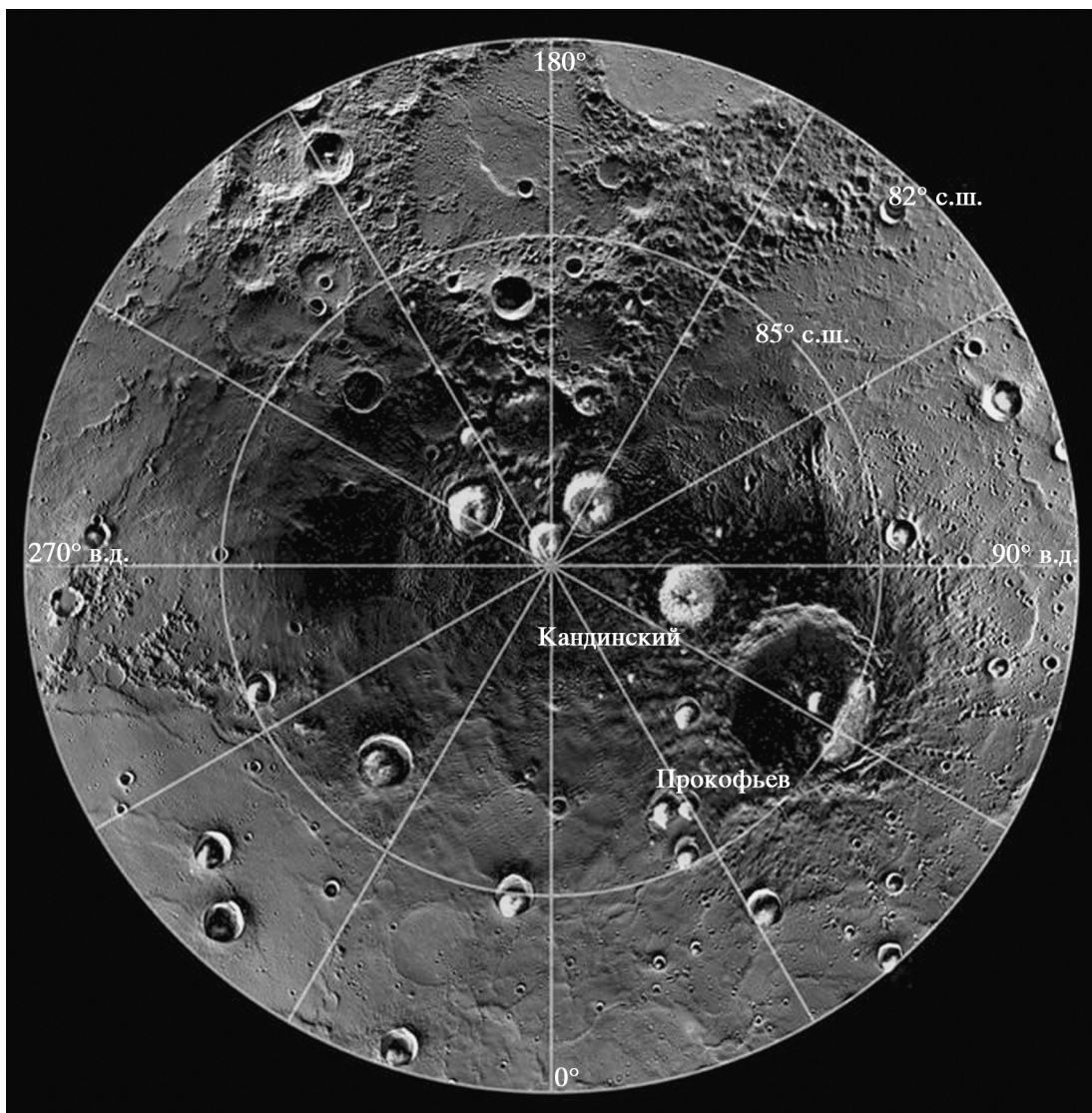


*Эскарпы на поверхности Меркурия. Снимки сделаны АМС «Мессенджер». Фото NASA.*

История поиска воды на Меркурии достойна отдельного подробного рассказа. Из-за своей близости к Солнцу Меркурий выглядит планетой, совсем не подходящей для поисков на ней водяного льда. Однако наклон оси вращения Меркурия к плоскости его орбиты близок к  $90^\circ$  (отличия составляют всего две угловые минуты), что приводит к тому, что в глубокие кратеры вблизи полюсов никогда не заглядывает солнце. Еще несколько десятилетий назад ученые предположили, что в этих ловушках может сохраняться водяной лед и другие летучие вещества в замороженном состоянии. В 1991 г. выполнены радарные исследова-

ния Меркурия с помощью радиотелескопа Аресибо в Пуэрто-Рико. Исследователи обнаружили необычные яркие пятна вблизи Северного полюса Меркурия. Именно так должны выглядеть в отраженных радиолучах залежи водяного льда. «Мессенджер» составил топографическую карту всей поверхности Меркурия, в том числе и ее северной околополярной области. Сравнение расположения ярких (в отраженных радиолучах) пятен на поверхности Меркурия с картой подтвердило, что все пятна расположены в вечно затененных областях, что косвенно подтверждало гипотезу о водяном льде. Ледяные отложения на дне вечно затененных кратеров были сфотографированы. Прямые солнечные лучи туда не попадают, но эти области все-таки немного подсвечиваются рассеянным светом, отражен-

ным стенками кратера. Увеличив время экспозиции, MDIS смог получить изображения вечно затененных областей, при этом освещенные области, окружающие кратер, оказались пересвеченными. Рассмотрим, например, снимки отложений водяного льда в кратере Фуллера. Моделирование температурного режима в этом кратере показало, что температуры там достаточно низки для того, чтобы водяной лед находился в грунте – но недостаточно низки, чтобы он мог находиться непосредственно на поверхности. Скорее всего (сумма фактов свидетельствует именно об этом), водяной лед в кратере Фуллера покрыт тонким слоем (его толщина оценивается в 10–30 см) очень темного, богатого органикой вещества, предохраняющего лед от сублимации. Четкая граница области



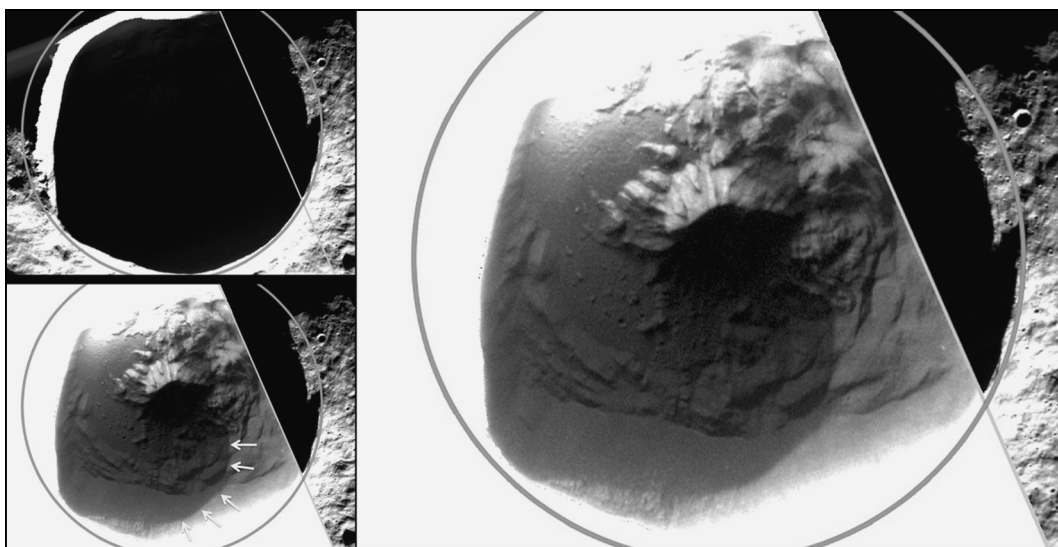
*Радарное изображение, наложенное на топографическую карту Северной околополярной области Меркурия. Все яркие желтые пятна оказываются расположенными на дне (или на стенках) глубоких кратеров. Составлено по данным АМС «Мессенджер».*

с низким альбедо говорит о геологической молодости этой особенности; в противном случае она бы уже «деградировала» под действием микрометеоритной бомбардировки.

Водяной лед может быть занесен на Мерку-

рий кометами, но, скорее всего, его происхождение связано с внутренними процессами. Как предполагают ученые, водяной пар постепенно просачивается к поверхности из недр Меркурия и за-

мерзает в холодных ловушках околополярных кратеров, откуда потом медленно сублимирует. Таким образом, отложения водяного льда находятся в динамическом равновесии – между на-



*Отложения водяного льда в 27-км вечно затененном кратере Фуллера. Кромка кратера показана окружностью. Вверху слева – «обычный» снимок кратера Фуллера, справа – снимок, сделанный с большой экспозицией. Стрелки на левом нижнем снимке показывают четкую границу очень темного органического материала, защищающего залежи водяного льда от сублимации. Фото NASA.*

мерзанием и сублимацией. Толщина ледяного слоя достигает как минимум нескольких метров; общая масса льда на Меркурии оценивается в  $10^{16}$ – $10^{18}$  г.

#### *Загадочные ямы*

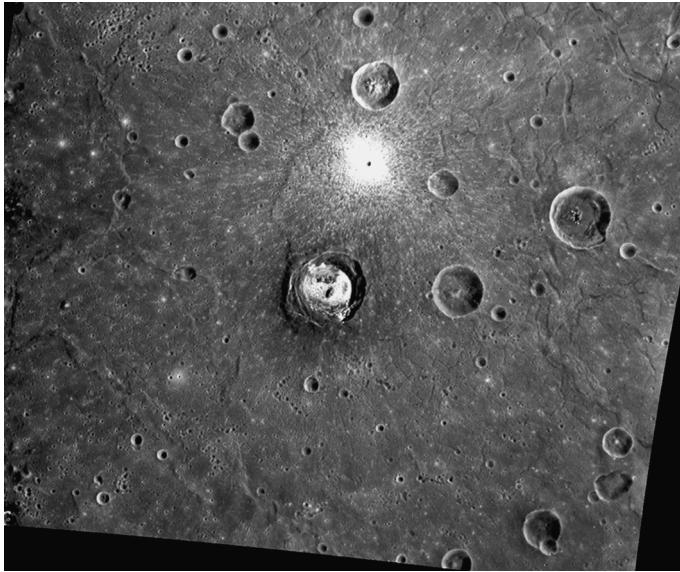
Уникальной особенностью Меркурия стали ямы, или рытвины (hollows). Этот тип рельефа не наблюдается более ни на одной планете

(или спутнике) Солнечной системы. Ямы представляют собой сравнительно яркие (их альбедо выше, чем у окружающей местности) округлые депрессии неправильной формы глубиной в несколько десятков метров; обычно они окружены размытым светлым галом. Ямы часто наблюдаются в ударных кратерах, причем их больше всего в наиболее горячих областях планеты. Так, в Северном полушарии они гораздо чаще встречаются на северных стенках кратера, обращенных к экватору и сильнее нагреваемых от солнечного света; оттенок ям – голубоватый (в отличие от красноватой поверхности Меркурия). Происхождение ям еще не ясно, но предполагается, что они сформировались путем сублимации поверхностных пород,

причем сформировались совсем недавно! Почти полное отсутствие в ямах ударных кратеров говорит о том, что этот тип рельефа в геологических масштабах очень молод. Многие детали формирования ям стали выясняться в конце полета АМС «Мессенджер» (когда она стала пролетать над поверхностью планеты очень низко). Разрешение некоторых снимков узкоугольной камеры MDIS достигло 4–7 м. Съемка склонов кратеров и вулканических кальдер показала, что ямы могут находиться на разной высоте, а, значит, сублимирующее вещество находится на разной глубине под поверхностью Меркурия; однако химический состав этого вещества до сих пор остается неизвестным.

На первый взгляд Меркурий выглядит геологически мертвым небесным





Ямы на Меркурии с отложениями яркого вещества на дне или на кромках ударных кратеров. Снимок низкого разрешения получен АМС «Мессенджер». Фото NASA.

телом, чья тектоническая активность угасла миллиарды лет назад, но более тщательное изучение планеты показывает, что это далеко не так. Кроме ям, формирующихся, похоже, прямо на наших глазах, исследователи обнаружили на поверхности Меркурия множество небольших эскарпов, чья глубина не превышает нескольких десятков метров, а возраст – менее 50 млн. лет. С учетом отложенный водяного льда в глубоких кратерах на полюсах планеты, покрытых свежим чехлом из темного органического вещества, становится ясно, что определенная активность на Меркурии продолжается и по сей день.

#### *Магнитное поле и магнитосфера*

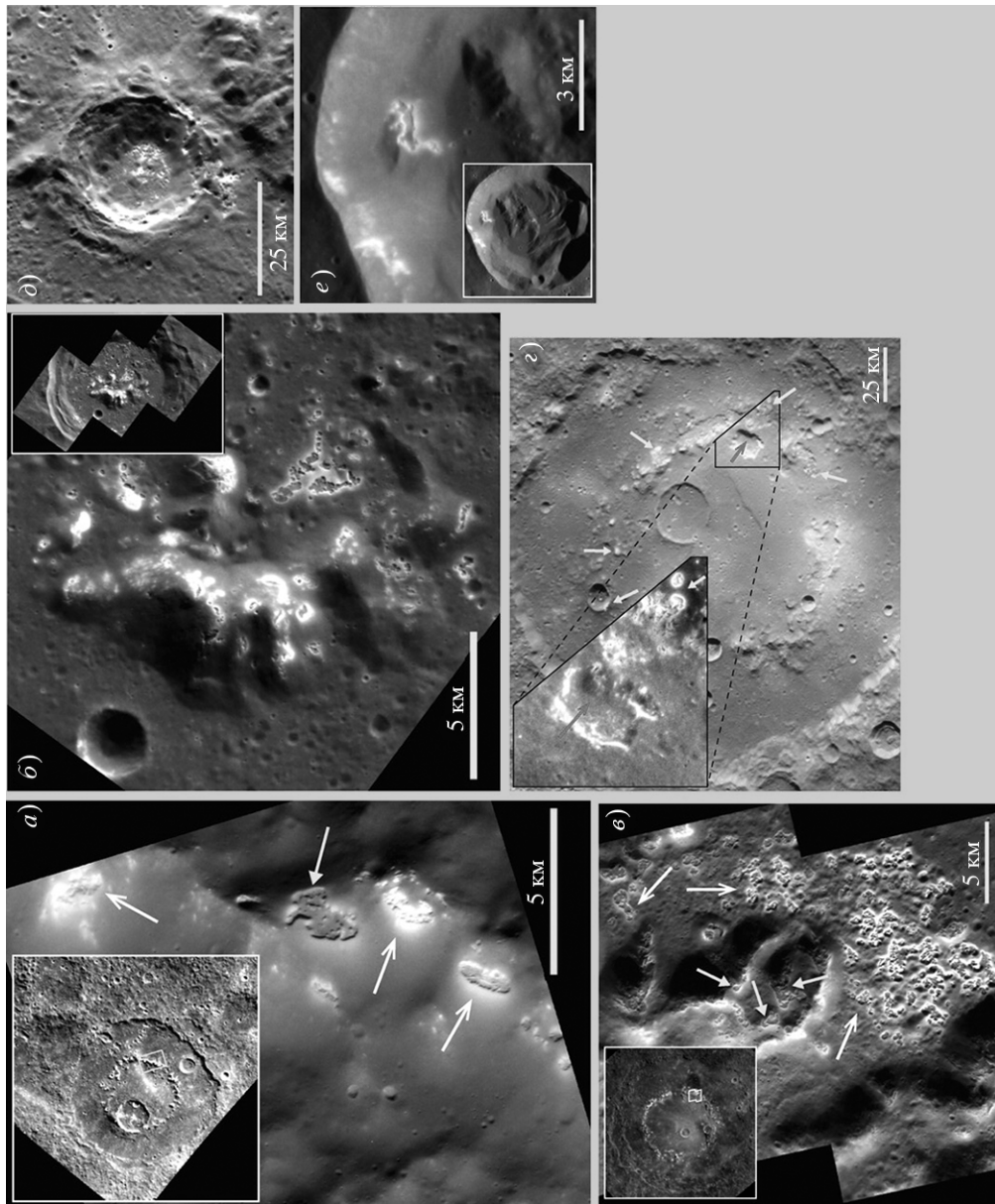
Среди планет земной группы только две име-

ют заметное магнитное поле – Земля и Меркурий. Еще во время пролетов АМС «Маринер-10» было определено, что Меркурий обладает собственным магнитным полем дипольной структуры, напряженность которого примерно в 100 раз меньше напряженности магнитного поля Земли – составляет около 300 нТ. Ось магнитного диполя отклоняется от оси вращения планеты на  $10^\circ$ , а его центр смещен относительно центра планеты к северу на 480 км (0,2 радиуса Меркурия). По-видимому, динамо-механизм в расплавленном металлическом внешнем ядре Меркурия, ответственный за генерацию внутреннего магнитного поля, имеет сильную асимметрию по линии север-юг. В результате этой асимметрии геометрия магнитных силовых

линий различна у Северного и у Южного полюсов: магнитная «полярная шапка» (область, где магнитные силовые линии не замкнуты и уходят в межпланетное пространство) гораздо больше у Южного полюса, нежели у Северного. Эта ситуация приводит к тому, что область вокруг Южного полюса больше облучается заряженными частицами, ускоренными в результате взаимодействия магнитосферы с солнечным ветром. Воздействие заряженных частиц на поверхность Меркурия способствует как генерации эфемерной атмосферы планеты, так и «космическому выветриванию» поверхностных пород.

#### *Экзосфера*

Меркурий лишен атмосферы, однако его все же окружает эфемерная газовая оболочка, которую можно назвать экзосферой; плотность атомов и молекул в экзосфере настолько низкая, что они чаще сталкиваются с поверхностью, чем друг с другом. Максимальная концентрация частиц у поверхности Меркурия



Неправильная округлая форма ям на Меркурии. Снимки высокого разрешения получены АМС «Мессенджер». Фото NASA.

оценивается в  $7,7 \times 10^4$  частиц/см<sup>3</sup>; больше половины из них приходится на атомарный кислород. В экзосфере Меркурия присутствуют также натрий, гелий, калий, кальций, магний и водород; есть и другие примеси. Впрочем, там могут находиться еще и водяной пар, молекулярный кислород и аргон. Искать эти составляющие будут уже следующие миссии к Меркурию.

Атмосферное давление у поверхности планеты составляет всего  $10^{-14}$  атм. Экзосфера пополняется разными способами: например, происходит «выбивание» космическими лучами атомов из поверхностных пород, в результате микрометеоритной бомбардировки и под жестким излучением Солнца захватываются ионы солнечного ветра (справедливо для водорода и гелия), происходит медленная сублимация водяного льда на полюсах Меркурия и распад радиоактивных элементов в

коре, приводящий к образованию атомов гелия и аргона. Атомов становится меньше обычно в результате фотоионизации и «убегания» образовавшихся ионов через магнитосферный «хвост». Между пополнением экзосферы и ее опустошением существует динамическое равновесие. Так, регулярные скачки содержания кальция в экзосфере Меркурия объясняются тем, что планета проходит через метеорный рой, образованный кометой Энке.

#### ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕРКУРИЯ

Исследования, проведенные АМС «Мессенджер», многократно умножили наши знания о Меркурии, однако множество вопросов так и остались нерешенными: каково происхождение Меркурия и почему его ядро настолько велико? каков точный состав экзосферы планеты и какова ее динамика? Не решена проблема асимметрии магнитного поля

Меркурия, до сих пор неизвестны многие детали его взаимодействия с солнечным ветром; не известен состав вещества, сублимация которого приводит к образованию ям. Для того, чтобы продолжить изучение Меркурия и ответить хотя бы на некоторые вопросы, нужна новая космическая миссия.

На 2017 г. намечен старт двух АМС по европейско-японской программе «Беппи Колombo» («Bepi Colombo»), названной так в честь итальянского математика и инженера Джузеппе Колombo (1920–1984) из Университета Падуи. Если полет пройдет по программе, то в 2024 г. Меркурия достигнут две АМС – «Mercury Planet Orbiter» (ESA) и «Mercury Magnetospheric Orbiter» (JAXA). Они продолжат изучение планеты на орбитах ее искусственных спутников и помогут нам лучше понять происхождение и эволюцию Меркурия.