

УДК 523.3;523.4

О ПРИРОДЕ АНОМАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ МЕРКУРИЯ И ЛУНЫ

© 2004 г. Е. А. Козлова

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия*

Поступила в редакцию 27.01.2004 г.

В работе изучены кратеры, расположенные в полярных областях Меркурия и Луны. Рассчитана площадь постоянно затененных областей в полярных районах обоих тел, для Луны – с учетом изменений положения полюса вращения Луны относительно полюса эклиптики за 18.6 лет, для Меркурия – в течение меркурианских солнечных суток. Рассчитаны изменения температуры в кратерах, совпадающих по расположению с областями повышенного содержания водорода для Луны и с областями, обладающими аномальными отражательными свойствами для Меркурия, в том числе в кратерах с аномальными областями, обнаруженными после исследований на модернизированном радиотелескопе обсерватории Аресибо (Harmon, Perillat и др., 2001). Выявлены кратеры, возможно, содержащие отложения водяного льда или других летучих соединений в полярных районах обоих тел.

ВВЕДЕНИЕ

Идея о возможности существования отложенных летучих в областях, постоянно остающихся затененными, в полярных районах Луны и Меркурия была высказана еще в работах (Watson и др., 1961; Thomas, 1974). В 1994 г. КА Clementine, запущенный НАСА, в течение 70 дней исследовал Луну. Орбита аппарата была выбрана так, чтобы часть ее пролегла над полярными районами Луны. В результате с помощью радарного эксперимента были обнаружены области с аномальными радарными свойствами (Nozette и др., 1996). Сигналы, отраженные от этих участков поверхности, имели характеристики, похожие на водяной лед, а не на силикатные породы. Сигналы, отраженные от областей, освещаемых Солнцем, отличались от сигналов от областей, находящихся в постоянной тени. Размеры отложений льда были предварительно оценены как от 60000 до 120000 м³. КА Lunar Prospector, запущенный НАСА в 1998 г. к Луне, был оснащен нейтронным спектрометром для обнаружения возможных отложений летучих в полярных областях Луны. Спектрометр регистрировал поток “тепловых” и “надтепловых” нейтронов от лунной поверхности. Надтепловые нейтроны образуются при столкновении быстрых нейтронов с атомами водорода и, таким образом, могут служить индикатором наличия водорода в данном районе поверхности. По этим данным была построена карта распределения областей с повышенным содержанием водорода по поверхности Луны. По данным КА Lunar Prospector (Feldman и др., 2001) содержание водорода в районе северного полюса Луны выше, чем в районе южного

полюса. Области повышенного содержания водорода совпали с районами таких кратеров как Миланкович (77.2° N, 170.2° E), Пласскетт (81.9° N, 175.7° E), Нансен (81.1° N, 95.4° E), Рождественский (85° N, 200.7° E), Эрмит (86° N, 272° E) и Бирд (85.5° N, 9.5° E). Максимальный поток надтепловых нейтронов соответствовал кратеру Пири (88.9° N, 32° E) и области западнее кратера Рождественский. Этот район характеризуется неровным рельефом и множеством мелких кратеров, которые могут содержать отложения летучих элементов. В районе южного полюса Луны повышенное содержание водорода было обнаружено в областях, совпадающих с такими кратерами, как Фаустини (87.2° S, 75.8° E), Кабео (85.2° S, 323° E), Вихерт (84° S, 164.5° E) (рис. 1) и рядом мелких кратеров. Эти кратеры, предположительно, можно считать “холодными ловушками” в полярных районах Луны. По сравнению с данными, полученными КА Clementine было обнаружено большее количество маленьких областей с повышенным содержанием водорода (Feldman и др., 2001).

Поверхность Меркурия неоднократно исследовалась методами наземной радиолокации. Исследования, проведенные в 1991–1992 гг. на радиотелескопах обсерваторий Голдстоун и Аресибо, показали, что радиоэхо, приходящее от некоторых областей в полярных районах планеты, по своим характеристикам похоже на эхо от ледяных спутников Юпитера и от южной полярной шапки Марса. Впоследствии необычное образование в районе южного полюса Меркурия было идентифицировано (Harmon, Slade, 1992) с крупным кратером Чао Менг-Фу (87.9° S, 103.5° W) (рис. 2).

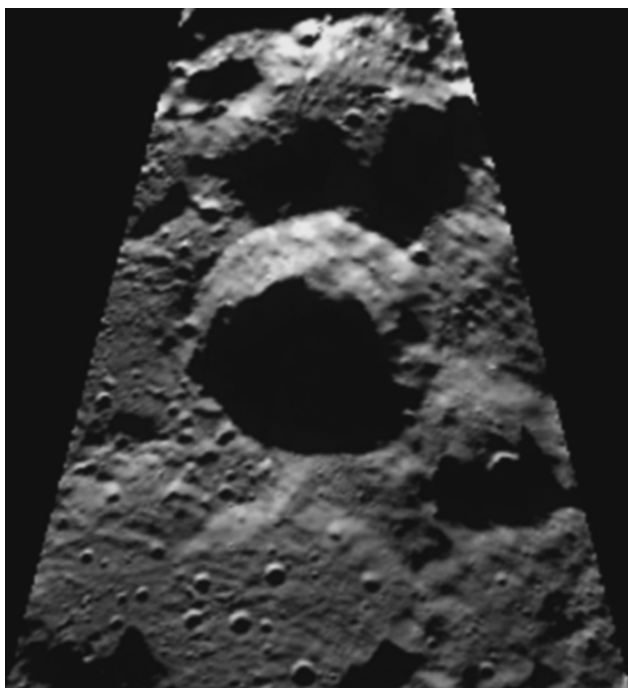


Рис. 1. Кратер Вихерт на Луне (84° S, 164° E, $D = 44$ км), расположенный в области повышенного содержания водорода, обнаруженной Ka Lunar Prospector (Feldman и др., 2001).



Рис. 2. Кратер Чао Менг-Фу на Меркурии (87.9° S, 103.5° W, $D = 161$ км), содержащий область X с аномальными отражательными свойствами (Harmon, Slade, 1992).

Были выдвинуты предположения, что области с необычными свойствами являются скоплениями летучих элементов в “холодных ловушках” полярных районов планеты. Наблюдения, проведенные в 1998–1999 гг. (Harmon, Perillat и др., 2001) на модернизированном радиотелескопе в Аресибо, подтвердили существование аномальных областей с необычными свойствами на Меркурии и позволили открыть новые. Такие области были обозначены латинскими буквами от A до Z. Из-за условий наблюдений район южного полюса был плохо изучен, поэтому всего там было найдены 4 такие области, в то время как в районе северного полюса Меркурия было найдено несколько десятков образований с аномальными свойствами. Все эти области имели серповидную форму и были идентифицированы с ударными кратерами, расположенными в полярных областях Меркурия. Некоторые из этих кратеров находятся на восточном полушарии Меркурия, которое не было отснято во время полета КА Mariner-10 (области A3, B3, C3 и др.). Кроме того, при наблюдениях 1998–1999 гг. (Harmon, Perillat, 2001) было уточнено положение полюсов вращения Меркурия: в системе координат старого полюса новое положение северного полюса Меркурия составило (88.7° N; 8° W).

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ МЕРКУРИЯ И ЛУНЫ

Луна движется вокруг Земли по эллиптической орбите. За время одного оборота по орбите расстояние от Луны до Земли меняется от 356410 км в перигее до 406740 км в апогее. Орбита Луны наклонена к плоскости эклиптики на $5^{\circ}8'7$. Длительность сидерического месяца (периода, за который Луна занимает прежнее положение относительно звезд) составляет 27.3 земных суток. Период, за который Луна занимает прежнее положение относительно Солнца (солнечные сутки), называется синодическим, его длительность немного больше, чем длительность сидерического, и составляет 29.5 земных суток (Шевченко, 1980). Орбитальные параметры Луны испытывают периодические и вековые возмущения из-за воздействия Земли. С большой точностью истинное вращение Луны описывают законы Кассини. Эти законы можно сформулировать следующим образом (Куликов, Гуревич, 1972).

1. Долгота восходящего узла лунного экватора на эклиптике равна долготе восходящего узла лунной орбиты, увеличенной на 180° .
2. Наклонение лунного экватора к эклиптике постоянно и равно $1^{\circ}32'$.
3. Луна вращается вокруг своей оси с равномерной скоростью и в том же направлении, в ка-

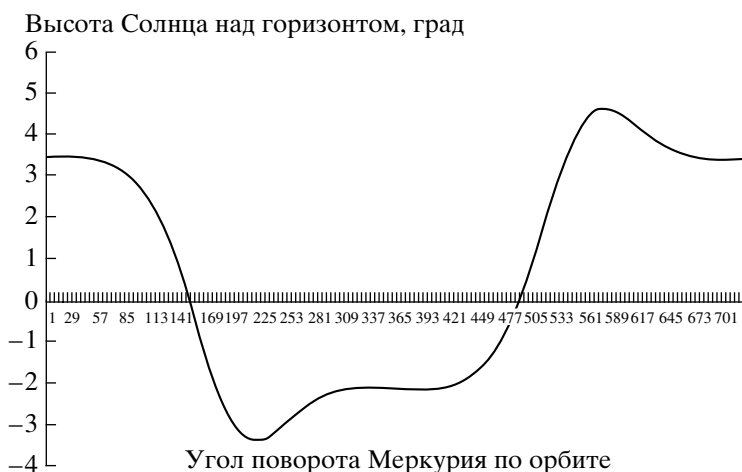


Рис. 3. Изменение высоты Солнца над горизонтом для кратера, содержащего область N на Меркурии, в зависимости от положения планеты на орбите. За начальную точку движения по орбите принято положение Меркурия, при котором долгота подсолнечной точки составляет 180° W.

ком она движется вокруг Земли. Период этого обращения равен периоду обращения Луны вокруг Земли.

В долготе перигея и узла лунной орбиты кроме периодических членов есть еще и вековые. Линия узлов движется в сторону, обратную движению Луны, это явление называется регрессией линии узлов. Регрессия линии узлов лунной орбиты аналогична земной прецессии (Куликов, Гуревич, 1972). Полный оборот вокруг полюса эклиптики полюс Луны совершает за 18.6 лет. Это составляет примерно 230 солнечных суток на Луне. На Земле прецессия вызывает “предварение равноденствий”, на Луне регрессия также влияет на изменение высоты Солнца над горизонтом. Перигей орбиты Луны совершает оборот за 8.85 года.

Меркурий движется вокруг Солнца по вытянутой эллиптической орбите ($e = 0.206$), плоскость которой наклонена к плоскости эклиптики под углом 7.0015° . Расстояние от Меркурия до Солнца меняется от 46.08 млн. км до 68.86 млн. км. Орбитальный период обращения вокруг Солнца (меркурианский год) составляет 87.97 земных суток. Расстояние от Меркурия до Земли меняется от 82 до 217 млн. км. Средняя скорость движения Меркурия по орбите вокруг Солнца 47.89 км/с. Период вращения Меркурия вокруг своей оси равен 58.6461 ± 0.0005 сут., что составляет $2/3$ от его орбитального периода обращения вокруг Солнца. Это обстоятельство является результатом действия приливного трения и крутящего момента гравитационных сил со стороны Солнца, обусловленного тем, что на Меркурии распределение масс не является строго концентрическим (центр масс смещен по отношению к геометрическому центру планеты). Обращение Меркурия вокруг Солнца и его собственное вращение приводят к тому,

что длительность солнечных суток на планете равна трем звездным меркурианским суткам или двум меркурианским годам и составляет около 175.92 земных суток. На долготах, близких к 90° и 270° , восход и заход Солнца примерно совпадает по времени с прохождением планетой перигелия своей орбиты и на некоторое время угловая скорость орбитального движения планеты превышает угловую скорость вращения планеты. Поэтому Солнце на небосклоне Меркурия на этих долготах движется неравномерно, описывает петли, поворачивает обратно и заходит. Через некоторое время оно снова восходит (рис. 3) (Ксанфомалити, 1998).

ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЛЕТУЧИХ НА ЛУНЕ И МЕРКУРИИ

Процессы, которые могут быть источниками летучих в холодных ловушках на Луне и Меркурии, разделяются на эндогенные и экзогенные. К эндогенным процессам относятся активный вулканизм, дегазация недр планет. Согласно оценкам (Thomas и др., 1988) Меркурий на ранних стадиях своей эволюции потерял значительную часть своей силикатной оболочки в результате столкновения с массивным телом. При этом кора и мантия Меркурия потеряли большую часть летучих соединений и, таким образом, процесс дегазации недр Меркурия недостаточен для объяснения наличия льдов в полярных районах планеты. В настоящее время для объяснения строения и химического состава Луны общепринята гипотеза мегаимпакта – столкновения Земли с телом, размером с Марс на ранних стадиях образования Земли, когда Земля уже прошла процесс дифференциации недр, и большая часть железа сосредоточилась в ее ядре (Benz и др., 1986; 1987). При этом в пространство

вокруг Земли было выброшено значительное количество вещества, в основном состоящего из пород силикатной мантии Земли, из которого впоследствии сформировалась Луна. Таким образом, Луна оказалась обеднена тяжелыми элементами, в частности железом. К сожалению, к настоящему моменту имеется мало информации о дегазации лунных недр. В работе (Fegley, 1991) показал, что основными продуктами дегазации могут быть CO, COS, CS, CS₂, SO и CO₂.

К экзогенным процессам возникновения отложений летучих в холодных ловушках Меркурия и Луны относятся: взаимодействие солнечного ветра с реголитом, микрометеоритная бомбардировка поверхности планет, столкновение с Луной и Меркурием комет и астероидов.

Основным подтверждением наличия отложенных летучих элементов, в частности водяного льда, в постоянно затененных областях в полярных районах Луны стало обнаружение с помощью нейтронного спектрометра, установленного на КА Lunar Prospector, избытка водорода на поверхности Луны в районе ее полюсов (Feldman и др., 2001). Этот избыток связывают с наличием водяного льда в глубоких, никогда не освещаемых Солнцем кратерах. В то же время, в работах (Старухина, 2000; Starukhina, 2001) показано, что протоны солнечного ветра могут химически связываться в реголите, причем уменьшение к полюсам потока солнечного излучения компенсируется увеличением эффективности накопления водорода. При этом протоны связываются в гидроксильные группы OH, не образуя молекул воды. Иная точка зрения содержится в работе (Crider, Vondrak, 2003). Согласно полученным ими результатам, протоны солнечного ветра образуют молекулы воды при взаимодействии с реголитом Луны, которые затем мигрируют в экзосфере Луны до тех пор, пока не попадут в “холодные ловушки” вблизи ее полюсов, где формируют отложения водяного льда. Количество льда в этом случае соответствует избытку водорода, обнаруженному КА Lunar Prospector.

Поток межпланетного вещества на Луну оценивается как $\sim(2 \pm 1) \times 10^6$ кг/год. Доля летучих в микрометеоритах составляет от 0.05 до 0.1 (Morgan, Shemansky, 1991), при этом основным компонентом этих летучих является вода, а максимальное количество летучих соединений содержится в углистых хондритах. При столкновении микрометеоритов с поверхностью Луны или Меркурия выделяются такие химические соединения, как H₂O, CO, CO₂, S, SO₂, H₂. В работе (Sprague и др., 1995) было выдвинуто предположение, что существование областей с аномальными отражательными свойствами в полярных кратерах Меркурия обусловлено присутствием соединений серы, а не водяного льда. Поверхность Меркурия богата со-

единениями серы и метеоритные удары по ней приводят к освобождению атомов S, которые впоследствии медленно мигрируют в области холодных ловушек. Кроме того, на Меркурии скорости соударений метеоритов и комет с поверхностью высоки и большая часть испарившегося при ударе вещества и выброшенных обломков покинет планету.

Гипотеза кометного происхождения отложенных летучих в полярных районах Меркурия и Луны связана со многими проблемами. Это обусловлено неопределенностями в оценках вероятности столкновения комет с Луной и Меркурием и вероятностью захвата кометного вещества гравитационным полем планет. Whipple (1978) предположил, что на больших расстояниях от Солнца блеск кометы пропорционален площади ее ядра. Согласно этому (Fernandez, 1984) оценил среднюю массу для молодой кометы 4.8×10^{13} кг и для большинства известных комет $\sim 2.6 \times 10^{14}$ кг. Верхний предел массы кометы получен на основании аккреционной теории происхождения комет и составляет 10^{21} кг. Массы короткопериодической кометы меняются от $(1.5-5.4) \times 10^{11}$ кг до 3.8×10^{14} кг. Частота столкновений комет с Луной во время кометных ливней составляет 1–2 падения за 10^6 лет при продолжительности ливня в несколько миллионов лет (Heisler и др., 1987).

В работе (Шевченко, 1999) показано, что при выпадении на поверхность Луны короткопериодической кометы с массой, равной 3.8×10^{16} г, и плотностью 0.3 г/см³ для накопления массы льда, соответствующей оценкам, полученным в работах (Arnold, 1979) и (Feldman и др., 2001), потребуется $\sim 10^4$ кометных падений на Луну. В случае падения на Луну долгопериодической кометы с параметрами кометы Хейла–Боппа: с плотностью ядра ~ 0.1 г/см³ и массой 3.4×10^{18} г, для накопления отложенных льда массой $\sim 10^{15}$ г потребуется всего 300 падений таких комет на Луну. Если предположить, что падение комет происходит равномерно, то при каждом падении образуется слой отложенного льда толщиной всего несколько сотых долей миллиметра. Скорость переработки грунта на Луне, по современным представлениям, составляет 10 мм за 10^7 лет. Таким образом, при равномерном падении комет возможно образование отложенных водяного льда только в виде силикатно-ледяной смеси. Поэтому для образования отложенного чистого льда необходимо более частое выпадение комет за относительно небольшой период времени: кометные ливни. При этом происходит выпадение новых долгопериодических комет типа кометы Хейла–Боппа. Предполагается, что участки с необычными альбедными характеристиками на Луне – “свирлы” – являются следами такого кометного ливня (Шевченко, 1996). В течение одного кометного ливня на Луну могло падать 4–5 комет (Шевченко, 1999). При падении на поверх-

ность Луны или Меркурия кометы с элементным составом, идентичным элементному составу кометы Галлея, образуется временная атмосфера, основными составляющими которой являются такие соединения как H_2 , CO , H_2O , CO_2 , N_2 , $HSOH$ и небольшое количество SO и SO_2 . При этом в “холодных ловушках” концентрируются H_2O , CO_2 , S и SO_2 . Эти соединения составляют основу льда кометного происхождения в “холодных ловушках”. В отложения летучих соединений, образованных в результате взаимодействия протонов солнечного ветра с поверхностью Луны, не должно быть серы или ее соединений, кроме того, CO_2 доставляется тоже только кометами. Помимо этого, в отложениях льда кометного происхождения должно быть аномально большое количество дейтерия (Berezhnoi, 1999). Исследование химического и изотопного состава льда в полярных районах Луны и Меркурия могло бы дать ответ на природу его происхождения.

Молекулы воды, созданные при ударах метеоритов или комет, попадая на освещенные солнцем области поверхности, переходят на баллистические траектории, до тех пор, пока не разрушатся в результате процессов фотодиссоциации или фотоионизации, или попадают в затененные области поверхности, где формируют отложения. Согласно (Vasavada и др., 1999) отложения CO_2 остаются стабильными в течение длительного времени при температурах, не превышающих 60 К, отложения NH_3 остаются стабильными при температурах, не превышающих 70 К, отложения соединений серы остаются стабильными длительное время при температурах, не превышающих 220 К. При увеличении толщины отложений на 1 м период их существования увеличивается на 1 млрд. лет. Работы (Vasavada и др., 1999) показали, что время полного испарения отложений водяного льда толщиной 1 м при температуре, не превышающей 110 К, составляет 1 млрд. лет. Из работы (Paige и др., 1992) следует, что в полярных областях Меркурия, вследствие высоких скоростей сублимации, на плоских поверхностях не могут существовать открытые отложения водяного льда (полярные шапки). Однако температуры в постоянно затененных областях топографических депрессий (например, кратеров) позволяют отложениям водяного льда сохраняться в течение нескольких миллиардов лет (Paige и др., 1992; Ingersoll и др., 1992). Аналогичная модель для Луны, разработанная в работах (Ingersoll и др., 1992), и (Salvail, Fanale, 1994), предсказывает существование отложений водяного льда в постоянно затененных областях в полярных районах Луны.

Работа (Killen и др., 1997) показала, что при температурах менее 110 К поток летучих, приносимых метеоритами, астероидами и кометами, уравнивает или превышает потери летучих в результате различных процессов. Кроме того,

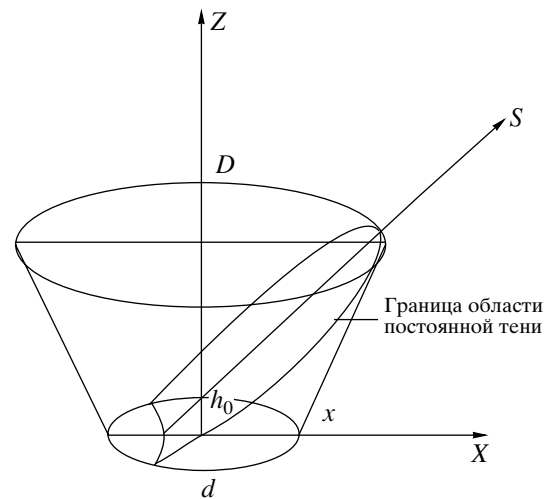


Рис. 4. Схема расположения постоянно затененной области в кратере конической формы. D – диаметр кратера, d – диаметр плоского дна кратера, S – направление на Солнце, Z – направление на точку зенита, X – направление на точку юга, h_0 – максимальная угловая высота Солнца над горизонтом, x – угол наклона стены кратера.

отложения льда могут быть покрыты слоем реголита, что замедлит процесс диффузии: (Killen и др., 1997) оценили, что локальные удары метеоритов и горизонтальный перенос обломков создают слой толщиной в 1 см за 50 млн. лет. Согласно этому, скорость аккреции молекул воды, поступающих из различных экзогенных источников, с учетом неопределенностей в деталях процессов, равна $1 - 12 \times 10^8$ молекул/(cm^2 с). При температурах $T < 115$ К ограничивающим количество накопленной воды процессом являются, согласно (Killen и др., 1997), удары микрометеоритов. В работе (Butler и др., 1993) показано, что толщина вероятного слоя реголита, покрывающего отложения льда в полярных кратерах Меркурия, менее 0.5 м. При этом слой реголита толщиной 0.1–0.5 м будет значительно снижать колебания температуры, почти не меня отражательные характеристики “холодной ловушки”.

ПОСТОЯННО ЗАТЕНЕННЫЕ РАЙОНЫ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ ЛУНЫ И МЕРКУРИЯ

Для выявления постоянно затененных областей в полярных районах Меркурия и Луны, были исследованы кратеры, расположенные в этих районах. Координаты и диаметры лунных кратеров были взяты из “Морфологического каталога кратеров Луны” (Родионова и др., 1987). Для работы использовались морфометрические параметры кратеров, взятые из (Родионова, Дегтярева, 1988). Кратеры больших размеров (диаметр >15 км) моделирова-

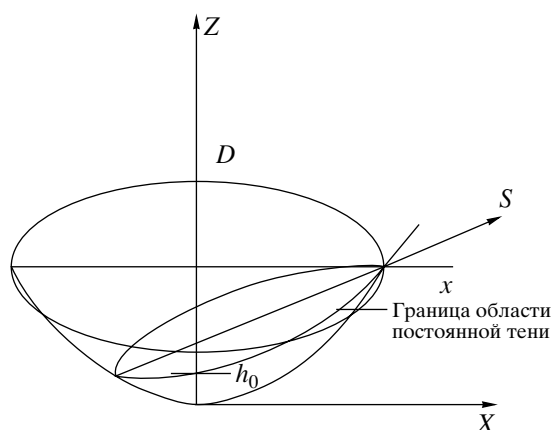


Рис. 5. Схема расположения постоянно затененной области в кратере сферической формы. D – диаметр кратера, S – направление на Солнце, Z – направление на точку зенита, X – направление на точку юга, h_0 – максимальная угловая высота Солнца над горизонтом, α – угол наклона стены кратера.

лись усеченным конусом (рис. 4), а малые кратеры (диаметр < 10 км) сферой (рис. 5).

Как и для Луны, на Меркурии кратеры больших диаметров (> 15 км) мы моделировали усеченными конусами (рис. 4), а кратеры малых диаметров ($10 \text{ км} < D < 15 \text{ км}$) – сферой (рис. 5). При исследовании Меркурия с помощью модернизированного радиотелескопа обсерватории Аресибо (Harmon, Perillat, 2001) области, обладающие аномальными отражательными свойствами, были обнаружены и на восточном полушарии Меркурия, для которого изображения поверхности отсутствуют. Две такие области расположены в районе северного полюса Меркурия, в крупных кратерах с диаметрами $D = 90$ км (область К) и $D = 50$ км (область J). Кратер, содержащий область К, является вторым по величине кратером, обладающим аномальными отражательными свойствами на Меркурии после кратера Чао Менг-Фу (область X).

Поскольку для кратеров К и J была известна только величина диаметров (Harmon, Perillat, 2001), то остальные морфологические признаки были вычислены исходя из предположения, что оба эти кратера относятся к 3 классу сохранности. Подобное предположение можно считать вполне обоснованным, поскольку все известные кратеры, обладающие аномальными отражательными свойствами на Меркурии, относятся к кратерам 1–3 класса сохранности. Большинство крупных кратеров при этом относится к 3 классу сохранности.

Данные о морфометрии кратеров Меркурия были взяты из работы Pike (1988). Согласно этому, свежие кратеры (которые мы отнесли к первой степени сохранности по терминологии “Морфологического каталога кратеров Меркурия”) с

диаметрами от 225 м до 15 км являются простыми кратерами и имеют чашеобразную форму с отношением d/D (глубина к диаметру) почти точно равным $1/5$. Зависимость глубины кратера d от его диаметра для таких кратеров описывается формулой:

$$d = 0.199 \times D^{1.029}. \quad (1)$$

Глубина более старых, модифицированных простых кратеров, отнесенных нами ко 2 степени сохранности, выражается зависимостью (Pike, 1988):

$$d = 0.151 \times D^{1.029}. \quad (2)$$

Pike (1988) выделяет на Меркурии два класса сложных кратеров (кратеров, имеющих террасы, пики, кольца): зрелых и незрелых. Незрелые кратеры занимают диапазон диаметров от 10 до 29 км и являются в целом более мелкими и более сложными морфологически, по сравнению с простыми кратерами. Они характеризуются наличием плоского дна. По терминологии “Морфологического каталога кратеров Меркурия” они относятся к 3 классу сохранности. Зависимость глубины кратера d и диаметра плоского дна D_0 от диаметра кратера для таких кратеров описывается формулами:

$$d = 0.410 \times D^{0.490}. \quad (3)$$

$$D_0 = 0.50 \times D^{0.99}. \quad (4)$$

Зрелые кратеры на Меркурии отличаются от незрелых, в основном только более крупными размерами. Согласно (Pike, 1988) к зрелым кратерам на Меркурии относятся кратеры с диаметрами от 30 до 175 км. По терминологии “Морфологического каталога кратеров Меркурия” такие кратеры относятся ко 2 и 3 классам сохранности. Зависимость глубины кратера d и диаметра плоского дна D_0 от диаметра кратера для таких кратеров описывается формулами:

$$d = 0.353 \times D^{0.496}. \quad (5)$$

$$D_0 = 0.203 \times D^{1.262}. \quad (6)$$

Мы не рассматривали кратеры 4 и 5 степени сохранности, так как эти кратеры сильно разрушены и поэтому не могут содержать больших областей постоянной тени.

Для вычисления площади зон постоянной тени и изменений температур в кратерах каждый кратер разбивался на 10 поясов по высоте и на 360 участков по окружности вала. Для модели усеченного конуса добавлялось разбиение плоского дна: на 10 участков по радиусу и на 360 по окружности дна. Таким образом, кратер сферической формы разбивался на 3600 элементов, а кратер в форме усеченного конуса – на 7200 элементов. Каждый элемент поверхности сферического кратера определялся двумя параметрами: углом поворота, отсчитываемым от положения точки юга, и высо-

той элемента. Элементы поверхности стены конического кратера определялись также двумя параметрами: углом поворота, также отсчитываемым от точки юга и высотой элемента. Элементы плоского дна кратера также определялись двумя параметрами углом поворота, отсчитываемым от точки юга, и расстоянием до центра кратера (Caruba, Corradini, 1999).

В полярных районах Луны было исследовано 2066 кратеров: 950 кратеров в районе северного полюса Луны и 1116 кратеров в районе южного полюса. Далее проверялось наличие постоянной тени в кратерах: области постоянной тени могут существовать в кратере, если угол наклона стен кратера больше угловой высоты Солнца над горизонтом на данной широте для любого момента времени в любой день в течение всего цикла регрессии узлов лунной орбиты. Углы наклона стен кратеров вычислялись исходя из диаметров вала кратера и вычисленных диаметров плоского дна кратера. Зоны постоянной тени были обнаружены в 257 кратерах в районе северного полюса Луны и в 296 кратерах в районе южного полюса Луны.

Всего в полярных районах Меркурия был исследован 831 кратер с диаметрами >10 км, из них 337 в районе северного полюса Меркурия и 494 в районе южного полюса Меркурия. Поскольку к настоящему моменту имеются снимки только 45% поверхности Меркурия, то мы можем говорить только о кратерах западного полушария, которое и было отснято во время полета КА Mariner-10. Области постоянной тени были обнаружены в 109 кратерах северного полушария и в 144 кратерах южного полушария Меркурия.

Площадь постоянно затененных областей в районе северного полюса Луны по нашим данным оценивается как 28260.2 км². В районе южного полюса Луны площадь постоянно затененных областей меньше, чем в районе северного полюса Луны и по нашим данным оценивается как 22168.5 км². Кратеры, содержащие области постоянной тени появляются выше 60° широты в обоих полушариях Луны. В районе северного полюса Луны в 100 кратерах области постоянной тени занимают более 10% и менее 30% площади кратера, в 63 кратерах площадь постоянно затененных областей превышает 30% и меньше 50% от полной площади кратера, в 34 кратерах площадь постоянно затененных областей превышает 50, но меньше 80% полной площади кратера. Только в 5 кратерах постоянно затененные области занимают более 80% площади кратера, причем максимальное затенение наблюдается в кратере (88.2° N, 230.6° E) с диаметром 13 км. В районе южного полюса в 111 кратерах площадь областей постоянной тени превышает 10% и меньше 30% от площади кратера, в 80 кратерах площадь областей постоянной тени больше 30% и

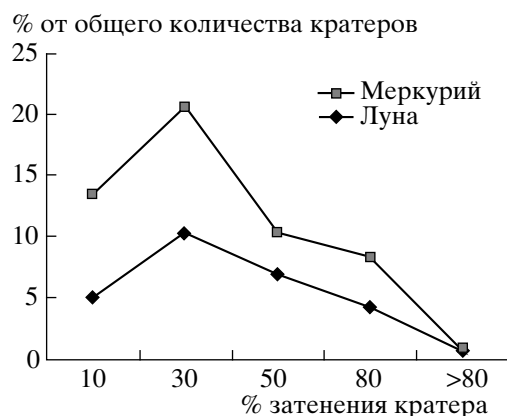


Рис. 6. Площади постоянно затененных областей в полярных кратерах Луны и Меркурия.

меньше 50% от площади кратера, в 53 кратерах площадь областей постоянной тени больше 50% и меньше 80% от площади кратера, а в 5 кратерах области постоянной тени занимают до 86% площади кратера (рис. 6). В табл. 1 приведены данные о площади постоянно затененных областей в наименованных кратерах в полярных областях Луны. В таких кратерах, как Пласкетт, Нансен и Миланкович, совпадающих с областями повышенного содержания водорода по данным КА Lunar Prospector (Feldman и др., 2001), постоянно затененных областей не обнаружено. Вероятно, повышенное содержание водорода в районе кратеров Пласкетт и Миланкович связано с областью с неровным рельефом, расположенной к западу от кратера Рождественский. Избыток водорода в районе кратера Нансен, возможно, объясняется наличием в этом районе мелких кратеров, которые могут содержать отложения летучих элементов.

Согласно полученным результатам, полная площадь постоянно затененных областей, расположенных в полярных кратерах Луны составляет 50428.7 км² или 0.13% от полной площади поверхности Луны. Это значительно меньше площади холодных ловушек, оцененной в работах (Arnold, 1979) и (Watson и др., 1961) – 0.48% и 0.44% площади поверхности Луны соответственно и меньше площади холодных ловушек из работы (Ueno и др., 1991), которые получили значение – 0.31% площади поверхности Луны. В работах (Станкевич и др., 2001) и (Петров и др., 2003) площади постоянно затененных участков поверхности Луны были рассчитаны по усредненным данным распределения кратеров, исходя из иерархического строения лунной поверхности: когда неровности большого масштаба перекрываются неровностями более мелкого масштаба и т.д. Расчет проводился для структур с размером от 1 м и более. Площадь оцененных таким способом постоянно

Таблица 1. Площадь постоянно затененных областей в наименованных кратерах в полярных районах Луны

Имя кратера	Широта, град	Долгота, град	Диаметр, км	Площадь постоянной тени, км ²	% от площади кратера
Байи	-66.7	290.9	295	290.6	0.4
Рождественский	85.1	200.7	161	3368.3	16.3
Амундсен	-84.8	84.8	96	950.5	13
Кабео	-85.2	323	90	530.1	8.3
Эрмит	86	272	85	978.3	17.1
Бирд	85.5	9.5	85	691.7	12.1
Нобиле	-85.3	54.8	76	948.2	20.6
Пири	88.9	32	70	318.9	8.2
Сильвестр	82.4	279.6	65	285.4	8.5
Де Ситтер	79.9	39	64	47.5	1.5
Чаллис	79.9	8.9	59	42.8	1.5
Фрелик	79.8	250.2	58	15.9	0.6
Мейн	81.2	10.6	56	163.9	6.6
Малаперт	-85.4	12.5	55	605.5	25.1
Фаустини	-87.2	75.8	45	823.2	50.9
Вихерт	-84	164.5	44	437.9	28.2
Джоя	83.4	2	43	369.9	24.9
Ритгенхауз	-74.3	106.9	32	61.5	7.3

затененных участков поверхности Луны составила 2.45% от полной площади поверхности Луны.

Ранее, площади постоянно затененных областей в полярных районах Луны были рассчитаны нами также для реального распределения кратеров, но без учета изменения высоты Солнца над горизонтом в течение 230 солнечных суток, которые составляют период регрессии узлов лунной орбиты (Kozlova и др., 2001). Кратеры моделировались цилиндрами, глубина которых рассчитывалась, как и в настоящей работе согласно данным, приведенным в работе (Родионова и др., 1987). Площадь постоянно затененных областей для такой модели кратеров составила ~1% от полной площади Луны.

По оценкам (Nozette и др., 1996) площадь постоянно затененных областей в широтном диапазоне $\pm 60^\circ \dots \pm 90^\circ$ составляет только 530 км² в районе северного полюса Луны, и 6361 км² в районе южного полюса Луны. Margot и др. (1999) оценили площадь постоянно затененных участков в полярных районах Луны в узком поясе широт выше $\pm 87.5^\circ$. В районе северного полюса площадь холодных ловушек составила 1030 км², в районе южного – 2550 км². Bussey и др. (2003) исследовали только мелкие кратеры полярных районов Луны с диаметрами от 2.5 км до 20 км. По их оценкам площадь постоянно затененных областей в диапазоне широт выше $\pm 70^\circ$ в северном полушарии составляет 7500 км², а в южном – 6500 км².

Различия в оценках площади постоянно затененных областей связаны с тем, что в настоящей работе исследуются реальные кратеры с диаметрами >10 км, но более мелкие кратеры не рассматриваются, что уменьшает оценку площади постоянной тени. Морфометрические параметры кратеров для Луны в перечисленных выше работах были взяты из работы (Pike, 1971), в то время как в настоящей работе использовались данные из работы (Родионова, Дехтярева, 1988). Кроме того, в нашей работе мы учитываем изменения полуденной высоты Солнца в результате прецессии полюса вращения Луны (явление регрессии линии узлов лунной орбиты). С учетом этого, площадь областей, никогда не освещаемых Солнцем, сокращается.

Полная площадь зон постоянной тени в районе северного полюса Меркурия по нашим оценкам составляет 21190.6 км². Всего из 109 кратеров с постоянной тенью на дне только в 34 кратерах площадь района постоянной тени меньше 10% от площади кратера. У 43 кратеров площадь постоянной тени составляет около 30% от площади кратера. Только у 13 кратеров постоянно затенена почти половина кратера. Площадь постоянной тени достигает почти 80% у 17 кратеров. И только у 2 кратеров (Е и Y) постоянная тень занимает более 80% площади кратера.

Полная площадь зон постоянной тени в районе южного полюса Меркурия согласно нашим данным составляет 24488.8 км², что значительно

Таблица 2. Площадь постоянно затененных областей в кратерах Меркурия, обладающих аномальными отражательными свойствами

Имя области в кратере	Широта, град	Долгота, град	Диаметр, км	Площадь постоянно затененной области, км ²	% от площади кратера
X	-87.9	103.5	161	14162.8	68.8
L2	82.4	148.1	69	393.1	10.4
C	87.9	166.5	51	1446.4	69.6
V	-79.6	79.6	45	120.6	7.4
W	81.2	100.2	45	183.5	11.3
U	-82.9	22.8	44	245.4	15.9
N	85.3	5.5	40	644.8	50.3
D	88.6	76.4	38	910.5	78.7
M	85.9	35.5	37	597.7	54.5
K2	82.8	152.9	34	173.6	18.7
M2	79.7	128.6	33	91.9	10.5
J2	81.7	153.7	31	126.6	16.4
G	-85.8	58.4	30	439.7	60.4
E	89.9	165.4	30	697.2	95.7
F	86	133.9	28	393.7	61.9
B	85.7	172.5	28	382.2	60.2
T	79.4	13	26	87	15.9
R	81.3	12.5	26	116.1	21.2
P	82.9	46.7	22	191.7	48.5
S	79.1	16.3	21	65.5	18.2
Q	82.1	39.3	19	141.8	47.8
Q2	82.6	83.7	19	147.4	49.7
L	85.1	63.3	18	169.9	63.6
V2	80.1	62.7	17	87.6	37.9
P2	83.1	91.6	16	117.2	55.2
Y	87.7	145.7	15	153	81.7
K	86	297	90	2796.3	43.2
J	88	280	50	732.45	36.5

больше, чем в районе северного полюса. Отчасти это объясняется тем, что плотность кратеров в районе южного полюса Меркурия выше, чем в районе северного полюса, где расположены обширные равнины. 36 кратеров содержат постоянную тень, площадь которой составляет менее 10% от площади кратера. В 44 кратерах область постоянной тени составляет около 30% от площади кратера. Только 13 кратеров имеют области постоянной тени, составляющие почти 50% от площади кратера. И только 1 кратер затенен почти на 80%. Из таблицы 2 видно, что одним из наиболее затененных крупных кратеров является кратер Чао Менг-Фу (X) (рис. 2), обладающий аномальными характеристиками, площадь постоянной тени в нем составляет 68.8% от площади кратера.

Как уже упоминалось выше, несколько заметных источников аномального радиоэха расположены в районе северного полюса на восточном полушарии Меркурия. Вторая по величине область с аномальными отражательными характеристиками К (после области X в кратере Чао Менг-Фу в южном полушарии) находится в кратере размером ~90 км (Harmon, Perillat, 2001) на восточном полушарии. Второй крупной областью с аномальными отражательными свойствами является образование J, так же расположенное на восточном полушарии Меркурия. Предположительно, это образование находится в кратере с диаметром 50 км и расположенном ближе к полюсу, чем кратер, содержащий область К. Поскольку фотографий данного района поверхности планеты не имеется, сложно оценить возраст и морфо-

логию вышеуказанных кратеров для расчета площади постоянной тени и температур внутри кратеров. По аналогии с кратерами такого же диаметра, расположенными на сфотографированном КА Maginet-10 западном полушарии Меркурия, мы присвоили этим кратерам 3 степень сохранности. Исходя из этого и проводился расчет глубины и диаметра дна кратеров. Соответственно рассчитывалась и площадь постоянной тени в этих кратерах. Площадь постоянной тени в кратере К составляет 43.2% от полной площади кратера, а в кратере J – 36.5% от полной площади кратера.

Суммарная площадь постоянно затененных областей в полярных районах

Меркурия по нашим данным составила 45679.4 км². Эта оценка хорошо согласуется с результатами, полученными в работе (Butler и др., 1993). Площадь постоянно затененных областей в полярных районах Меркурия по данным (Butler и др., 1993) составляет ~30–50 тыс. км², или около 0.07% площади поверхности Меркурия.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В КРАТЕРАХ

Для планеты, находящейся на расстоянии D_i от Солнца, поток энергии, приходящий от Солнца, равен:

$$F_0 = \sigma T_0^4 (R_0/D_i)^2. \quad (7)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана, T_0 – температура Солнца ($T_0 = 6000$ К), R_0 – радиус Солнца ($R_0 = 696000$ км), D_i – расстояние от Солнца до планеты. Учитывая значительную удаленность системы Земля–Луна от Солнца, мы приняли D_i для Луны равным среднему расстоянию от Солнца до Земли: 150000000 км = 1 а.е. Двигаясь по орбите вокруг Земли, Луна совершает полный оборот вокруг своей оси относительно Солнца за 29.5 земных суток (синодический месяц или солнечные сутки). Полный оборот вокруг полюса эклиптики полюс вращения Луны совершает за 18.6 лет или 230 солнечных суток. Для Меркурия с учетом вытянутости орбиты ($e = 0.206$), расстояние меняется в зависимости от положения планеты на орбите. За начальное положение Меркурия на орбите нами было принято положение, при котором подсолнечная точка имела долготу 180°. В дальнейшем долгота подсолнечной точки λ_S вычислялась исходя из скорости движения Меркурия по орбите и скорости вращения Меркурия вокруг своей оси.

Поток солнечной энергии, падающий на точку на поверхности планеты с долготой λ_T , равен:

$$F_1 = F_0 \cos(\lambda_S - \lambda_T). \quad (8)$$

Из работы (Carruba, Corradini, 1999) известно, что поток, падающий на площадку стены кратера, равен:

$$F_2 = F_1 (\sin h_0 \cos x - \cos h_0 \sin x \cos \theta). \quad (9)$$

где h_0 – высота Солнца над горизонтом, x – наклон стены кратера, θ – азимутальный угол между направлением на Солнце и направлением на данный элемент поверхности кратера из центра кратера. Формула (9) была выведена в работе (Carruba, Corradini, 1999) для конического кратера. Как и при расчете площади постоянно затененных областей, внутренняя поверхность кратеров разбивалась на 10 поясов по высоте и 360 секторов по окружности вала. Для кратеров сферической формы поверхность каждого пояса аппроксимировалась конической поверхностью с углом наклона x_m , который рассчитывался как:

$$x_m = \arctg(d/(10(s_m - s_{m-1}))). \quad (10)$$

где d – глубина кратера, s_m и s_{m-1} расстояния от m -го и $(m-1)$ -го пояса до центра кратера, соответственно. Согласно Ueno и др., 1991, температура любого j -го элемента поверхности кратера равна:

$$T_j = [(F_3 + (1-a)[F_2 + F_4 + F_5 + F_6])/\epsilon\sigma]^{1/4}. \quad (11)$$

где a – альbedo поверхности (0.09 для Меркурия и 0.08 для Луны), ϵ – коэффициент излучения: $\epsilon = 0.98$ для Луны (Carruba, Corradini, 1999), $\epsilon = 0.95$ для Меркурия (Vasavada и др., 1999). F_2 – поток прямого солнечного света, падающий на освещенный элемент поверхности кратера. F_3 – тепловой поток из недр планеты, который оценивается для Луны как 9.0×10^{-8} Вт/м² (Arnold, 1979). F_4 – поток, отраженный от освещенной поверхности кратера (Ueno и др., 1991):

$$F_4 = aF_2 \sum_i (\delta S_i / 2\pi r_i^2), \quad (12)$$

где δS_i – площадь освещенного прямым солнечным светом элемента стены. r_i – расстояние между освещенным элементом i и рассматриваемым элементом j . F_5 – вторично отраженный световой поток от элемента k внутренней поверхности кратера:

$$F_5 = a^2 F_2 \sum_k (\delta S_k / 2\pi r_k^2), \quad (13)$$

где δS_k – площадь элемента k , r_k – расстояние между элементом поверхности k и элементом j . F_6 – поток инфракрасного излучения, падающий на рассматриваемый элемент поверхности кратера j (Ueno и др., 1991):

$$F_6 = \epsilon\sigma \sum_k (\delta S_k / 2\pi r_k^2) T_k^4, \quad (14)$$

где T_k – температура элемента k . Если рассматриваемый элемент поверхности j находится в тени, то поток F_2 в формуле (11) равен нулю.

Данная формула не учитывает тепловой поток от соседних элементов кратера, но вследствие низкой теплопроводности реголита на Луне: $\sim 10^{-2}$ – 10^{-3} Вт/м К (Ueno и др., 1991) и на Меркурии: $\sim 10^{-2}$ Вт/м К (Vasavada и др., 1999), этим потоком можно пренебречь. Кроме того, мы пренебрегаем влиянием солнечного ветра, так как он почти не проникает в постоянно затененные области (Carruba, Corradini, 1999).

РЕЗУЛЬТАТЫ: ТЕМПЕРАТУРЫ В КРАТЕРАХ ПОЛЯРНЫХ РАЙОНОВ ЛУНЫ

Как уже было указано выше, для того чтобы такие соединения как CO_2 и NH_3 могли в течение долгого времени существовать в постоянно затененных областях необходимо, чтобы температура в этих областях не превышала 60 и 70 К соответственно. Отложения водяного льда остаются стабильными в течение длительного времени, если максимальная температура не превышает 110 К. При наличии слоя реголита, температурный предел повышается до 130–150 К (Vasavada и др., 1999). А соединения серы остаются стабильными, если максимальная температура не превышает 220 К.

На Луне, в таких кратерах как Эрмит, Пири, Кабео, Нобиле, а так же в безымянном кратере (87.2° N , 358.9° E , $D = 17$ км), существуют области, в которых в течение всего периода 18.6 лет максимальная температура не превышает 60 К. Расположение этих кратеров совпадает с местами обнаружения повышенного содержания водорода (Feldman и др., 2001), так что эти кратеры с большой долей вероятности содержат отложения летучих, в частности отложения водяного льда.

Максимальная температура в постоянно затененных областях кратеров Фаустини, Амундсен, Джоя, Вихерт, и безымянном кратере (82.3° N , 120.9° E , $D = 52$ км), не превышает 110 К, что исключает возможность существования там таких соединений, как CO_2 и NH_3 , но позволяет предположить наличие отложений водяного льда, не покрытых слоем реголита или соединений серы.

В таких кратерах как Сильвестр, Мейн, Малперт, Де Ситтер, Чаллис, Фрелик и безымянные кратеры (85.1° N , 151.2° E , $D = 36$ км), (85.5° S , 48.1° E , $D = 30$ км), максимальная температура в постоянно затененных частях кратера достигает 120–150 К. При таких значениях максимальной температуры водяной лед может оставаться в стабильном состоянии только под слоем реголита.

Максимальная температура в кратерах Байи и Риттенхауз слишком высока (>190 К), чтобы какие-либо летучие соединения, кроме соединений

серы, могли существовать в этих кратерах в течение длительного периода времени.

ТЕМПЕРАТУРЫ В КРАТЕРАХ ПОЛЯРНЫХ РАЙОНОВ МЕРКУРИЯ

Из-за особенностей движения Меркурия вокруг Солнца, максимальная температура внутри кратера достигается не обязательно в полдень, когда высота Солнца над горизонтом максимальна, а когда максимален поток энергии от Солнца.

Среди исследованных здесь кратеров Меркурия, обладающих аномальными отражательными свойствами, кратеры, совпадающие с областями D и E, могут кроме отложений серы содержать отложения водяного льда, непокрытого слоем реголита, а так же отложения других летучих соединений, таких как CO_2 и NH_3 . Максимальные температуры в затененных частях кратеров с областями X, C, J, F не превышают 110К, что исключает существование отложений таких летучих соединений как CO_2 и NH_3 , но позволяет сохраняться в течение длительного периода отложениям водяного льда. В кратерах с областями G, N, M, M2, K, K2, B, L, L2, P, J2, Q2, V, V2 и U максимальная температура в неосвещаемых частях кратеров превышает 110 К – предел, при температурах выше которого стабильное существование водяного льда без покрытия слоем реголита невозможно. За аномальные характеристики отраженного сигнала в кратерах R, T, P2, S и Q, скорее всего, ответственны отложения соединений серы, так как даже в затененных областях максимальные температуры превышают 170 К.

Результаты оценки температур в полярных кратерах Луны, совпадающих с областями повышенного содержания водорода, в среднем на 30–50 К выше, чем аналогичные результаты, полученные в работах (Paige и др., 1992; Ingersoll и др., 1992). Различия в оценках могут быть связаны с тем, что все кратеры в этих работах моделировались сегментами сферы с различной величиной соотношения глубина/диаметр, в то время как такое приближение справедливо лишь для кратеров с диаметрами ≤ 15 км. В работе (Vasavada и др., 1999) также был рассчитан температурный режим в полярных кратерах Луны и Меркурия. Как и в нашей модели, кратеры малых диаметров (диаметр ≤ 15 км) моделировались сегментом сферы, кратеры более крупных диаметров моделировались усеченными конусами. Для Меркурия учитывались орбитальные особенности его движения. Полученные температуры для лунных кратеров в среднем на 30 К выше, чем результаты нашей модели. Кроме того, наблюдается небольшое расхождение для кратеров Меркурия в значениях температур. В работе (Salvail, Fanale, 1994) температурный режим в полярных кратерах Луны и Меркурия рассчитывался с учетом орбитальных

и сезонных вариаций. Их результаты хорошо согласуются с результатами, полученными в нашей работе для кратеров Луны, но отличаются от результатов, полученных нами для кратеров Меркурия.

Расхождения в оценках температур, вероятно, вызваны тем, что в предыдущих работах для кратеров Луны не учитывалось изменение высоты Солнца в результате регрессии линии узлов лунной орбиты, которое приводит к увеличению освещаемой Солнцем площади внутри кратера, и, следовательно, к повышению температуры внутри кратера. Для Меркурия мы рассчитывали температуры с учетом нового положения полюсов вращения планеты (Harmon, Perillat, 2001), что, вероятно, является причиной расхождений в оценках температур в исследованных кратерах Меркурия. Кроме того, в настоящей работе были исследованы кратеры Меркурия с аномальными отражательными свойствами, обнаруженные в результате исследований на модернизированном радиотелескопе обсерватории Аресибо (Harmon, Perillat, 2001).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследованы полярные области Луны и Меркурия, в которых предположительно могут находиться отложения водяного льда или других летучих соединений, доставленных, возможно, на эти тела падениями метеоритов и комет. В качестве возможных “холодных ловушек” для летучих соединений рассматривались реальные крупные кратеры (диаметром более 10 км). Для Луны расчет площади постоянно затененных областей и температур внутри кратеров проводился с учетом изменения положения полюса вращения Луны относительно полюса эклиптики с периодом 18.6 лет. Выявлено совпадение кратеров, содержащих постоянно затененные области, температура в которых позволяет летучим соединениям оставаться стабильными в течение длительного периода времени, с областями повышенного содержания водорода по данным КА Lunar Prospector. Это позволяет предположить, что повышенное содержание водорода в этих районах связано не с взаимодействием протонов солнечного ветра с реголитом Луны, а с наличием в постоянно затененных областях отложений водяного льда. Для Меркурия площадь постоянно затененных областей и температуры внутри кратеров рассчитывались с учетом особенностей движения планеты по орбите вокруг Солнца. Согласно полученным данным, в большинстве кратеров, обладающих аномальными отражательными свойствами, могут находиться отложения летучих, в том числе водяного льда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ксанфомалити Л.В.* Парад планет. М.: Наука, 1998. 256 с.
- Куликов К.А., Гуревич В.Б.* Основы лунной астрометрии. М.: Наука, 1972. 392 с.
- Петров Д.В., Шкуратов Ю.Г., Станкевич Д.Г.* и др. Площадь холодных ловушек на поверхности Луны // *Астрон. вестн.* 2003. Т. 37. № 4. С. 285–291.
- Родионова Ж.Ф., Карлов А.А., Скобелева Т.П. и др.* Морфологический каталог кратеров Луны. М.: Изд-во МГУ, 1987. 173 с.
- Родионова Ж.Ф., Дехтярева К.И.* Основные морфометрические характеристики лунных кратеров // *Тр. ГАИШ.* 1988. Т. LX. С. 179–183.
- Станкевич Д.Г., Шкуратов Ю.Г., Петров Д.В.* Оценка площади постоянно затененной поверхности Луны // *Астрон. вестн.* 2001. Т. 35. № 6. С. 501–506.
- Старухина Л.В.* К вопросу о происхождении избытка водорода на лунных полюсах // *Астрон. вестн.* 2000. Т. 34. № 1. С. 1–5.
- Шевченко В.В.* Современная селенография. М.: Наука, 1980. 288 с. Шевченко В.В. Диффузные структуры на Луне как следы кометного ливня // *Астрон. вестн.* 1996. Т. 30. № 1. С. 59–73.
- Шевченко В.В.* О кометном происхождении лунного льда // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33. № 5. С. 400–408.
- Arnold J.R.* Ice in the lunar polar regions // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. P. 5659–5668.
- Benz W., Slattery W.L., Cameron A.G.* The origin of the Moon and the single impact hypothesis I // *Icarus.* 1986. V. 66. P. 515–535.
- Benz W., Slattery W.L., Cameron A.G.* Planetary collision calculations: Origin of the Moon // *LPSC XVIII.* 1987. P. 60–61.
- Bereznoi A.A.* Determination of the main source of water in lunar cold trap // *LPSC XXX.* 1999. Abstr. #1598.
- Butler B.J., Muhleman D.O., Slade M.A.* Mercury: Full-disk radar images and the detection and stability of ice at the north pole // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 15003–15023.
- Bussey D.B.J., Lucey P.G., Robinson M.S., et al.* Permanently shadowed in simple craters near the lunar poles // *LPSC XXXIV.* 2003. Abstr. #1897.
- Carruba V., Corradini A.* Lunar cold traps: Effects of double shielding // *Icarus.* 1999. P. 402–413.
- Crider D.H., Vondrak R.R.* Space weathering effects on lunar cold trap deposits // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № E7. P. 151–156.
- Fegley B.J.* Thermodynamic model of the chemistry of lunar volcanic gases // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. № 11. P. 2073–2076.
- Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B., et al.* Evidence for water ice near the lunar poles // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 23231–23252.
- Fernandez J.A.* The distribution of the perihelion distances of short-period comets // *Astron. and Astrophys.* 1984. V. 135. P. 129–134.
- Harmon J.K., Slade M.A.* Radar mapping of Mercury: Full-disk images and polar anomalies // *Science.* 1992. V. 258. P. 640–643.

- Harmon J.K., Perillat P.J.* High-resolution radar imaging of Mercury's north pole // *Icarus*. 2001. V. 149. P. 1–15.
- Heisler J., Tremaine S., Alcock S.* The frequency and intensity of comet showers from the Oort Cloud // *Icarus*. 1987. V. 70. N. 2. P. 269–288.
- Ingersoll A.P., Svitek T., Murray B.C.* Stability of polar frost in spherical bowl-shaped craters on the Moon, Mercury, and Mars // *Icarus*. 1992. V. 100. P. 40–47.
- Killen R.M., Benkhoff J., Morgan T.H.* Mercury's polar caps and the generation of an OH exosphere // *Icarus*. 1997. V. 125. P. 195–211.
- Kozlova E.A., Michael G.G., Shevchenko V.V.* Permanently shadowed areas at the lunar poles // 34-th Int. Microsymp. on planetology. Moscow, 2001. Abstr. #MS065.
- Margot J.L., Campbell D.B., Jurgens R.F., Slade M.A.* Topography of the lunar poles from radar interferometry: A survey of cold trap location // *Science*. 1999. V. 284. P. 58–60.
- Morgan T.H., Shemansky D.E.* Limits to the lunar atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 1351–1367.
- Nozette S., Lichtenberg C.L., Spudis P., et al.* The Clementine bistatic radar experiment // *Science*. 1996. V. 274. P. 5292–5300.
- Paige D.A., Wood S.E., Vasavada A.R.* The thermal stability of water ice at the poles of Mercury // *Science*. 1992. V. 258. P. 643–646.
- Pike J.R.* Genetic implication of the shapes of martian and lunar craters // *Icarus*. 1971. V. 15. P. 384–395.
- Pike J.R.* Geomorphology of impact craters on Mercury // *Mercury* / Eds Vilas F., et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 1988. P. 165–273.
- Salvail J.R., Fanale F.P.* Near-surface ice on Mercury and the Moon: A topographic thermal model // *Icarus*. 1994. V. 111. P. 441–455.
- Sprague A.L., Hunten D.M., Lodders K.* Sulfur at Mercury, elemental at the poles and sulfides in the regolith // *Icarus*. 1995. V. 118. P. 211–215.
- Starukhina L.V.* Water detection on atmosphereless celestial bodies: Alternative explanations of the observations // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № 7. P. 14701–14710.
- Thomas G.E.* Mercury: Does its atmosphere contain water? // *Science*. 1974. V. 183. P. 1197–1198.
- Thomas G.E., Masson P., Fleitout L.* Tectonic history of Mercury // *Mercury* / Eds Vilas F., et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 1988. P. 401–428.
- Ueno S., Mukai T., Azuma H.* Temperature distribution in the Permanently shadowed Area in lunar polar regions // *Proc. 24th ISAS Lunar and Planetary Symposium*. ISAS. 1991. P. 190–196.
- Vasavada A.R., Paige D.A., Wood S.E.* Near-Surface Temperatures on Mercury and the Moon and the Stability of Polar Ice Deposits // *Icarus*. 1999. V. 141. P. 179–193.
- Watson K., Murray B.C., Brown H.* The behavior of volatiles on the lunar surface // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66. P. 3033–3045.
- Whipple F. L.* Comets // *Cosmic dust*. 1978. P. 1–73.