

УДК 523.41-655

СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ РЕГОЛИТА МЕРКУРИЯ. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ПОЛЯРИМЕТРИЯ В 2000–2002 гг.

© 2004 г. Н. Н. Киселев, Д. Ф. Лупишко

Институт астрономии Харьковского национального университета им. В.Н.Каразина, Украина

Поступила в редакцию 23.12.2002 г. После исправления 14.07.2003 г.

Работа содержит детальный обзор исследований свойств и особенностей реголита Меркурия по данным наземных поляриметрических, фотометрических и др., а также космических (Mariner-10) измерений и результаты поляриметрических наблюдений, проведенных авторами в течение трех видимостей планеты в 2000–2002 гг. Анализ опубликованных данных указывает на то, что процессы созревания реголита на поверхности Меркурия должны быть существенно более интенсивными, чем на поверхности Луны. Кроме того, орбитальные характеристики Меркурия позволяют предположить, что интенсивность созревания его реголита, а следовательно, и оптические свойства поверхности, могут заметным образом зависеть от планетоцентрической долготы. Поляризационные наблюдения Меркурия, выполненные в 2000–2002 гг. на 70-см рефлекторе, действительно обнаружили вариации степени поляризации по поверхности с амплитудой около 1.5% в диапазоне планетоцентрических долгот 265–330°. Для выяснения природы этих вариаций необходимо провести дополнительные наблюдения Меркурия в максимально широком диапазоне планетоцентрических долгот наблюдаемой поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Меркурий – особая планета в Солнечной системе со многих точек зрения. Период осевого вращения Меркурия (58.646^d) и орбитальный период (87.969^d) находятся в точной соизмеримости 2:3. Это приводит, в частности, к тому, что солнечные сутки на Меркурии равны двум периодам обращения Солнца. Важным следствием отмеченной соизмеримости является то, что проходя перигелий, Меркурий всегда обращен к Солнцу поочередно то одной, то другой полусферой. В частности, нулевой и противоположный (180°) меридианы Меркурия по очереди обращены к Солнцу при прохождении им перигелия, и в подсолнечных точках на этих меридианах происходит наибольший нагрев поверхности (так называемые “горячие полюса” планеты, в отличие от “теплых полюсов” на меридианах 90° и 270°, которые обращены к Солнцу в афелиях орбиты). Из-за близости к Солнцу, отсутствия плотной атмосферы и относительно большой продолжительности дня и ночи Меркурий среди остальных планет и спутников испытывает наибольшие перепады температуры поверхности: днем она может подниматься до 452°C, а ночью опускаться до –183°C. Такие регулярно повторяющиеся перепады температуры, по-видимому, должны отразиться на микроструктурных особенностях поверхности.

Помимо традиционных наземных наблюдений Меркурия в оптическом диапазоне, большой объем качественно новой информации был получен с помощью радарных наземных наблюдений, а также с помощью КА Mariner-10 во время трех его

сближений с планетой в 1974–1977 гг. Это данные о наличии, величине и характере магнитного поля (Ness и др., 1975; Jackson, Beard, 1977), о структуре макрорельефа поверхности (Murray и др., 1974; Pike, 1988; Schultz, 1988), о присутствии тонкой атмосферы (Hunten и др., 1988; Hunten, Sprague, 1997), о возможном наличии водяного льда (или отложений серы) и его мощности вблизи полюсов планеты (Slade и др., 1992; Butler и др., 1993) и др. Тем не менее среди планет земной группы Меркурий остается наименее изученной планетой. В то же время он представляет большой интерес и прежде всего потому, что наряду с астероидами, его можно рассматривать как наилучшим образом сохранившийся реликт стадии формирования больших планет (Маров, 1986). Особенности состава и внутреннего строения Меркурия, его магнитное поле, рельеф поверхности и прочее безусловно связаны с особенностями процессов формирования самой планеты и ее эволюции в период постагрегационной интенсивной бомбардировки крупными телами, имевшей место около 3.9 млрд. лет назад. А это означает, что изучение Меркурия может дать существенную информацию о происхождении и эволюции других планет и Солнечной системы в целом, что является одним из основных мотивов планирования и подготовки предстоящей космической миссии к Меркурию (Langevin, 1997; Curtis и др., 1998). В связи с этим интерес к изучению этой планеты в последние годы возрос, о чем свидетельствует публикация ряда обзорных статей (Ксанфомалити, 2001; Шевченко, 2002).

Таблица 1. Средние параметры фазовых кривых поляризации Меркурия и Луны (λ 550 нм) (Bowell, Zellner, 1974)

Объект	$P_{\min}$, %	Поляриметрич. наклон h	α_{inv} , град	$P_{\max}$, %	Геометр. альbedo ¹	Цвет ($U-V$) ³
Меркурий	1.4 ± 0.1	0.147 ± 0.002	25 ± 2	$8.2; (8.8)^{1/2}$	0.140	1.34
Луна	1.2 ± 0.05	0.148 ± 0.005	23.6 ± 0.5	8.6	0.136	1.38

¹⁾ Данные из Veverka и др. (1988) и Mallama и др. (2002).

²⁾ По данным Gehrels и др. (1987).

³⁾ По данным Tholen и др. (1999).

СВОЙСТВА РЕГОЛИТА МЕРКУРИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ЭВОЛЮЦИИ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

Основная информация о наличии и свойствах реголита Меркурия получена по данным наземных поляриметрических и радиометрических наблюдений планеты. В дальнейшем она была подтверждена инфракрасными измерениями, а также изображениями поверхности, полученными с борта КА Mariner-10. При ее анализе в качестве некоторого эталона для сравнения используются данные о наиболее изученном реголите Луны, ре-же – Марса и астероидов (см., например, Matson и др., 1977).

Как известно, одним из наиболее чувствительных методов обнаружения реголита у безатмосферных космических тел является поляриметрия. Первые поляриметрические наблюдения Меркурия были проведены Lyot еще в 1922–1924 гг. (Lyot, 1929) с помощью визуального поляриметра (λ 580 нм) на Медонской обсерватории (Франция). Были выполнены 24 измерения степени поляризации света, отраженного диском Меркурия, причем с довольно высокой точностью – порядка 0.1%. В 1930 г. Lyot провел поляриметрические наблюдения Меркурия на обсерватории Пик-дю-Миди (Франция) в дневное время и получил значения степени поляризации при малых фазовых углах в диапазоне $\alpha = 5\text{--}22^\circ$. Влияние поляризации дневного света исключалось с помощью разработанного им оптического компенсатора (Lyot, 1930). Полученные Lyot данные позволили ему сделать заключение о том, что поляризация Меркурия, усредненная по видимому диску, почти идентична лунной поляризации, следовательно, поверхность Меркурия должна быть покрыта порошкообразным веществом, подобным вулканическому пеплу.

В дальнейшем поляриметрические наблюдения Меркурия были выполнены Dollfus в 1950 г. с аналогичным визуальным поляриметром на 60-см рефракторе обсерватории Пик-дю-Миди. В исключительно хороших астроклиматических условиях были проведены многочисленные измерения поляризации отдельных деталей на диске Меркурия в двух фильтрах (520 и 630 нм), а для 17 дат с лучшим качеством изображений была измерена так-

же поляризация, усредненная по диску планеты (Dollfus, 1953). Результаты наблюдений показали очень хорошее совпадение с данными Lyot.

В 1966 и в 1972 гг. поляриметрические наблюдения Меркурия были проведены с новым фотоэлектрическим поляриметром в пяти фильтрах в диапазоне длин волн 352–580 нм (Dollfus, Auriere, 1974). Вместе с предыдущими наблюдательными данными, включая данные Lyot, а также несколько измерений, полученных Ingersoll в 1970 г. (Ingersoll, 1971), они позволили получить фазовые кривые интегральной (т.е. усредненной по видимому диску) поляризации Меркурия в 6-ти участках видимого спектра в области 350–630 нм и в широком диапазоне фазовых углов. Отметим, что в одном из фильтров (580 нм) фазовая зависимость была получена в диапазоне фазовых углов $\alpha \approx 4\text{--}130^\circ$, включающем области максимальной отрицательной ($\alpha_{\min} \approx 10^\circ$) и максимальной положительной ($\alpha_{\max} \approx 110^\circ$) поляризаций Меркурия. Все эти данные обобщены и проанализированы в работе (Dollfus, Auriere, 1974). Основные результаты этого анализа сводятся к следующему.

1. Фазовая зависимость поляризации Меркурия показывает значительное сходство с соответствующей зависимостью для интегральной Луны (табл. 1). Некоторые участки лунной поверхности, а также образцы лунного грунта имеют практически одинаковые с Меркурием зависимости (особенно в области отрицательной поляризации), что указывает на лунный тип поверхности последнего. В ряде своих работ, опубликованных в 1955–1965 гг., Dollfus доказывает, что форма фазовой кривой в области $\alpha = 0\text{--}23^\circ$ (отрицательная ветвь) прямо связана с микроструктурой поверхности и для Луны она соответствует мелкозернистому и сильно поглощающему материалу, например, порошку базальта. Таким образом, поверхность Меркурия должна быть почти вся покрыта реголитовым слоем лунного типа, скорее всего из темного поглощающего материала, переработанного микрометеоритной бомбардировкой.

2. Максимум положительной поляризации Меркурия ($P_{\max}$) находится вблизи $\alpha = 110^\circ$ и уменьшается с ростом длины волны примерно, как и для Луны. Смесь в одинаковой пропорции

двух образцов лунного грунта воспроизводит $P_{\max}$ Меркурия почти точно. Геометрическое альbedo смеси на $\lambda = 585$ нм составляет $p_v = 0.130$ и характеризует поверхность, промежуточную между морями и континентами Луны. Таким образом, реголит Меркурия оптически идентичен лунным порошкообразным реголитам из наиболее светлых морских областей.

3. Оценки поляриметрического альbedo поверхности Меркурия, полученные по зависимости “ $P_{\max}$ – альbedo”, откалиброванной по измерению образцов лунного грунта, составляют 0.122 и 0.144 для темных и светлых областей диска, соответственно. Это дает величину контрастов на поверхности Меркурия, равную 0.15 против 0.50 для Луны. Несмотря на то что измеренные контрасты Меркурия в значительной степени занижены атмосферным замытием, они представляются все же меньшими, чем в случае морей и континентов Луны.

4. Имеет место тенденция к возрастанию положительной поляризации деталей на диске Меркурия при уменьшении их альbedo (закон Умова).

Несмотря на в общем значительное сходство оптических свойств реголитов Меркурия и Луны, между ними могут быть и различия, вызванные разными условиями формирования и последующей эволюции (переработки) их поверхностей. Под этими условиями, по-видимому, следует понимать а) элементный состав вещества в протопланетном облаке в зонах формирования Меркурия и системы Земля-Луна (например, различия в содержании металлов и других тяжелых элементов, что может повлиять на состав и свойства вещества в коре планеты); б) интенсивность тяжелой бомбардировки в постаккреционный период (возможность выхода лавы на поверхность планеты с образованием “морских”, т. е. более гладких лавовых областей; в) интенсивность метеоритной и микрометеоритной бомбардировок поверхности, формирующей гранулометрический состав реголита; г) облучение поверхности космическими лучами и солнечным ветром; д) температурные условия, проявление вулканизма, возможное приливное воздействие на планету и др. Перечисленные условия (процессы), безусловно, различаются на гелиоцентрических расстояниях Меркурия и Земли, что и должно вызывать различия в свойствах меркурианского и лунного реголитов (см., также Шевченко, 2002). Кратко проанализируем основные из причин возможных различий, используя данные работы (Langevin, 1997).

Кратерообразование. На Меркурии не обнаружено следов проявления вулканизма или другой геологической активности на протяжении последних 3 млрд. лет (Spudis, Guest, 1988), поэтому эволюция поверхности его должна быть обусловлена внешними процессами и, прежде всего, мете-

оройдной бомбардировкой. Поток метеороидных тел на малых гелиоцентрических расстояниях изучен слабо, однако предполагается, что при учете гравитационной фокусировки он должен быть примерно таким же, как и для Луны (Hartmann, 1977; Langevin, 1997). В то же время средние скорости соударений на Меркурии составляют ~20 км/с, а на Луне – 14 км/с (Langevin, 1997), следовательно, энергия столкновения на единицу массы на Меркурии будет в два раза больше, чем на Луне. В отличие от астероидов и других малых тел, основную роль в процессах кратерообразования на Меркурии, как и на Луне, играет гравитация. Поскольку на поверхности Меркурия сила гравитации в 2.3 раза больше, чем на Луне, то в значительной степени она будет компенсировать отмеченную выше разницу в энергиях столкновения с точки зрения объема выброшенного вещества при образовании кратера. Учитывая эти факторы, а также примерно одинаковую статистику кратеров на поверхности обоих тел (Ström, Neukum, 1988), можно заключить, что подобно Луне поверхность Меркурия должна быть покрыта слоем реголита толщиной 5–10 м (Langevin, 1997).

Микрометеороидная бомбардировка. Эволюция гранулометрического состава реголита (т.е. размера частиц) контролируется в основном микрометеоритной бомбардировкой поверхности, которая приводит к фрагментации и эрозии частиц вещества, агглютинации их и образованию стекол, селективному испарению вещества с последующей конденсацией на поверхность частиц в виде пленок и к другим последствиям, объединяемым понятием созревания реголита (грунта). Источниками потоков микрометеоритов являются астероиды, кометы и зодиакальная пыль. Имеющиеся данные космических измерений (КА Pioneer-10, -11) и стратосферных указывают на то, что вклад кометной составляющей доминирует во фракции легчайших частиц (<1 мг). Из-за больших эксцентриситетов орбит микрометеороидов кометного происхождения скорость их столкновения с Меркурием составляет около 60 км/с (с Луной – 40 км/с), что намного выше, чем для астероидных частиц. Вклад частиц зодиакальной пыли, которые приближаются к Солнцу по спирали (эффект Пойтинга–Робертсона), соответствует вкладу микронных частиц кометного или астероидного происхождения. Согласно моделям орбитальной эволюции частиц зодиакальной пыли и данным КА Helios-1 и -2 поток этих частиц в области орбиты Меркурия в 10 раз больше, чем вблизи орбиты Луны. Микрометеороидная бомбардировка поверхности Меркурия приводит к тому, что фрагментация становится более эффективной для частиц поверхности с размерами >100 мкм, в то время как агглютинация доминирует на частицах <20 мкм. Фрагментация и агглютинация являются как бы противоборствующими

Таблица 2. Относительные значения характеристик динамических процессов, определяющих переработку реголита Меркурия (для Луны значение соответствующей характеристики принято за единицу)

Энергия столкновения на единицу массы крупных метеороидных тел ($m \gg 1$ г) и кометных частиц ($m < 1$ мг)	2
То же для частиц зодиакальной пыли	25
Интенсивность облучения солнечными космическими лучами и фотонами	10
Поток частиц зодиакальной пыли	10
Интенсивность бомбардировки малыми телами	10

процессами: с возрастанием времени экспозиции элемента поверхности сначала средний размер частиц уменьшается в результате фрагментации, а потом начинают преобладать процессы агглютинации, которые увеличивают средний размер частиц. Согласно Langevin (1997) между этими процессами устанавливается динамическое равновесие при среднем размере частиц около 40 мкм.

Космические лучи и солнечный ветер. В то время как поток галактических космических лучей на орбитах Меркурия и Луны должен быть одинаковым, потоки солнечных космических лучей и солнечного ветра изменяются с гелиоцентрическим расстоянием $\sim 1/r^2$. Однако здесь нужно учитывать два фактора: орбитальный резонанс 2:3 (о котором говорилось выше) и возможное экранирование магнитосферой Меркурия. Первый фактор приводит к тому, что облучение Солнцем элемента поверхности (фотонами, солнечными космическими лучами и солнечным ветром) сильно зависит от его долготы и в перигелии (т. е. на меридианах 0° и 180°) оно в 2.3 раза выше, чем в афелии (90° и 270°). Из-за второго фактора оценить интенсивность потока солнечного ветра, достигающего поверхности Меркурия, не представляется возможным. Его воздействие на реголит поверхности состоит в аморфизации слоя внешних частиц толщиной около 500 мкм, которые непосредственно облучаются. В зрелом лунном грунте до 50% зерен показывают такое аморфное покрытие. Интересно, что эти пленки понижают альбедо на величину до 30% (Langevin, 1997). Если бы не было магнитосферного экранирования, то можно было бы ожидать, что на Меркурии такими аморфными пленками было бы покрыто большинство зерен реголита (поскольку интенсивность потока солнечного ветра была бы почти на порядок больше, чем на Луне), и альбедо поверхности Меркурия было бы меньше, чем альбедо Луны. Однако это не наблюдается.

Радиационный нагрев поверхности. Отмеченные выше неравномерный нагрев поверхности и большой перепад температур “ночь-день” (около 635°C) могут накапливать радиационные эффек-

ты (спекание частиц, потеря наиболее летучих элементов, отжиг пород, растрескивание и др.) в структуре верхнего слоя поверхности. В результате этого могут появиться различия в структуре поверхности полушарий с центральными меридианами 0° и 180° с одной стороны, и 90° и 270° – с другой. На Луне смена дня и ночи происходит чаще, чем на Меркурии (примерно через 30 дней), но перепад температур при этом находится в пределах от 100°C – 117°C днем до -170°C ночью (Taylor, 1999).

На Луне наблюдается весь диапазон созревания реголита: от свежего грубозернистого с низким содержанием стекол (незрелая поверхность) до тонкозернистого с содержанием стекол до 50% в наиболее зрелых грунтах. Интенсивность бомбардировки поверхности Меркурия малыми телами минимум в 10 раз больше, чем на Луне, поэтому диапазон созреваемости грунта будет примерно таким, как для Луны при 10-кратном увеличении времени экспозиции ее поверхности. Т.е. меркурианский реголит должен быть в среднем более зрелым, чем лунный, со средним размером частиц около 40 мкм и содержанием стекол (агглютина-тов) до 70% (Langevin, 1997).

Вывод о тонкозернистом реголите Меркурия подтверждается данными поляриметрии и фотометрии (Dollfus, Auriere, 1974), а также оценками теплопроводности (Veverka и др., 1988), которая у меркурианской почвы ниже, чем у лунной, несмотря на большую (из-за большей гравитации) плотность упаковки частиц в поверхностном слое.

В табл. 2 подытожены результаты сравнения основных динамических характеристик процессов, определяющих переработку (эволюцию) реголитов Луны и Меркурия по данным (Langevin, 1997).

Приведенные характеристики указывают на то, что скорость созревания меркурианского реголита должна быть намного выше, чем лунного. И поэтому вывод Langevin о более зрелом реголите Меркурия кажется обоснованным. Однако в ряде работ (Matson и др., 1977; Pieters и др., 1993) было показано, что созревание лунного реголита с образованием агглютинатов и поверхностных пленок на частицах сопровождается понижением их альбедо и возрастанием показателя цвета. Т.е. более зрелые реголиты должны быть более темными и красными. Такое изменение оптических характеристик в результате созревания, как показали данные Mariner-10 (Harpe и др., 1975), характерно и для меркурианского грунта: свежие кратеры имеют более голубой цвет и очень высокое (вплоть до 0.45) альбедо. В то же время интегральные альбедные и цветовые характеристики обоих тел почти не различаются (см. табл. 1). Возможными причинами такого рассогласования могут быть различия в минералогии поверхнос-

тей, а также в интенсивности процессов обновления поверхностей в результате бомбардировки их крупными телами и образования макрократеров. Однако, как мы уже отмечали, поток крупных метеороидных тел в окрестностях орбит Меркурия и Луны примерно одинаков, а более высокая скорость их столкновений с поверхностью Меркурия при образовании кратеров компенсируется большей его гравитацией, поэтому все это предполагает, что скорости обновления реголита на поверхностях этих тел не должны сильно различаться.

Что же касается возможных существенных различий в минералогии, то это, скорее всего, имеет место. Так, данные Mariner-10 указывают на то (Нарке и др., 1975), что комбинация высокого альbedo с более голубым, по сравнению с Луной, цветом у свежего меркурианского грунта может быть следствием малого содержания титана (Ti), восстановленного железа (Fe) и окисленного двухвалентного (Fe^{+2}). А высокое альbedo (т.е. слабое поглощение света) может быть обусловлено присутствием полевого шпата или кварца. Об этом свидетельствуют и данные микроволнового диапазона ($\lambda = 0.3\text{--}20.5$ см), согласно которым меркурианский реголит не менее чем в 2–3 раза более прозрачен, чем лунные моря, и не меньше, чем на 40% более прозрачен, чем лунные материи (Mitchell, de Pater, 1994). Это различие авторы связывают с вероятным более низким содержанием Fe и Ti в меркурианском реголите, что согласуется с его более высоким визуальным альbedo. Данные Mariner-10 показали, что альbedo участков поверхности Меркурия систематически более высокое, чем для соответствующих (материковых) лунных областей (Нарке и др., 1975). По цветовым и альбедным характеристикам поверхности Меркурия (данные Mariner-10) оценено содержание FeO в меркурианском грунте (<6 вес. %), что в два раза меньше, чем в лунном грунте (Strom, 1999). Таким образом, в отличие от Луны, поверхность Меркурия может быть сложена базальтами с низким содержанием Ti и Fe, что согласуется с ее более высоким альbedo в визуальных лучах и более низким – в дальнем УФ-диапазоне (Strom, 1999).

Не исключено также, что магнитное поле Меркурия довольно эффективно экранирует облучение его поверхности солнечными космическими лучами и солнечным ветром (интенсивность которого примерно на порядок больше, чем для лунной поверхности) и, таким образом, уменьшает вклад этой составляющей в процесс созревания.

Говоря о возможных глобальных вариациях оптических свойств реголита Меркурия, вызванных различной интенсивностью облучения и радиационного нагрева полушарий с центральными меридианами 0° , 180° и 90° , 270° , следует упомянуть,

что картирование поверхности Меркурия, с использованием ПЗС-изображений, полученных в течение пяти видимостей планеты (1995–1999 гг.) с помощью Шведского вакуумного солнечного телескопа ($D = 0.5$ м, Ла-Пальма), не выявило заметных фотометрических различий между полушариями (Warell, Limaye, 2001). В то же время эти наблюдения показали, что контрасты между светлыми пятнами и общим более темным фоном поверхности в визуальных лучах достигают значений 35% (а иногда, например, лучевой кратер Койпер, до 50%) и уменьшаются в ближнюю инфракрасную область (940 нм) до 25%.

В противоположность этим данным недавно опубликованные результаты ПЗС-фотометрии Меркурия по наземным и космическим (с помощью широкоугольного коронографа на КА SOHO – Solar and Heliospheric Observatory) наблюдениям (Mallama и др., 2002) показывают вариации блеска Меркурия в зависимости от средней долготы освещенного диска с амплитудой около 0.05^m . При этом минимумы кривой блеска находятся вблизи долгот 0° и 180° , а максимумы – вблизи 90° и 270° . Таким образом, на “горячих” меридианах поверхность Меркурия является более темной, чем на меридианах 90° и 270° . Это различие может быть результатом того, что многократно повторяющиеся довольно большие (хотя и не очень резкие) перепады температуры “день-ночь”, особенно на меридианах 0° и 180° , могут приводить к накоплению эффектов отжига (оплавления) пород, что может сказаться на структуре поверхности и ее оптических (например, поляризационных) свойствах. Кроме того, данный эффект может быть также результатом различий в интенсивности созревания меркурианского грунта из-за неодинакового облучения поверхности фотонами, солнечным ветром и солнечными космическими лучами, интенсивность которых, как уже отмечалось, в перигелии (долготы 0° и 180°) в 2.3 раза больше, чем в афелии (долготы 90° и 270°). Эффект, безусловно, небольшой, различие в яркости полушарий составляет около 5%, а какое различие из-за этого будет в степени поляризации? Используя эмпирическое соотношение между $P_{\max}$ и альbedo (Dollfus, Auriere, 1974), нетрудно получить, что величина $P_{\max}$ должна изменяться в зависимости от долготы центрального меридиана с амплитудой около 0.5%, т. е. достаточно большой для уверенного обнаружения. Не исключено, что эти вариации могут в какой-то мере компенсироваться другой волной вариаций, обусловленной различиями в структуре поверхности на долготах “горячих” и “холодных” полюсов. Отметим, что в статье (Gehrels и др., 1987) анализируются результаты поляризметрических наблюдений Меркурия в области фазовых углов $53^\circ\text{--}130^\circ$ и в диапазоне длин волн 340–960 нм, полученные авторами в 1964–1970 гг. на разных телескопах, но с одним и тем же поля-

Таблица 3. Результаты поляриметрии Меркурия

Дата UT	Полоса	α , град	$P \pm \sigma$, %	$\Theta \pm \sigma$, град	χ , град	L , град
2000, Июль 29.055	GC	97.0	7.65 ± 0.07	179.5 ± 0.6	272.3	292.5
30.053	BC	93.1	8.92 ± 0.10	3.7 ± 0.5	272.3	294.9
30.067	GC	93.0	7.72 ± 0.06	5.5 ± 0.5	273.4	294.9
Август 01.054	RC	85.0	6.62 ± 0.05	5.2 ± 0.4	275.8	299.9
01.070	GC	84.9	7.52 ± 0.17	6.6 ± 0.8	275.8	299.9
07.056	RC	59.0	4.19 ± 0.03	14.2 ± 0.4	282.2	314.8
07.067	GC	59.0	5.06 ± 0.03	15.6 ± 0.5	282.2	314.8
08.063	RC	54.5	4.03 ± 0.04	15.4 ± 0.5	285.1	317.6
08.074	GC	54.5	3.94 ± 0.05	14.4 ± 0.6	285.1	317.6
09.066	RC	50.1	3.44 ± 0.04	17.2 ± 0.5	286.7	320.4
09.077	GC	50.0	4.05 ± 0.06	22.5 ± 0.6	286.7	320.4
10.065	RC	45.7	2.64 ± 0.03	20.8 ± 0.5	288.3	323.3
10.075	GC	45.7	3.42 ± 0.04	24.9 ± 0.6	288.3	323.3
2001, Июль 07.049	GC	113.6	$7.03 \pm .23$	170.0 ± 0.7	283.4	273.8
09.051	GC	107.4	8.13 ± 0.18	183.4 ± 0.5	281.5	279.3
16.046	GC	83.8	7.05 ± 0.08	177.0 ± 0.3	273.6	298.5
17.047	GC	80.2	7.28 ± 0.06	178.6 ± 0.3	272.3	301.3
18.048	GC	76.4	6.02 ± 0.06	0.0 ± 0.3	269.7	304.0
20.049	GC	68.6	5.10 ± 0.06	4.3 ± 0.3	268.5	309.5
21.051	GC	64.5	4.86 ± 0.06	6.3 ± 0.3	267.4	312.3
26.065	GC	43.4	3.86 ± 0.08	27.3 ± 0.5	260.3	326.0
27.068	GC	39.1	2.31 ± 0.14	29.9 ± 1.2	258.5	329.8
2002, Май 06.731	V	113.2	6.32 ± 0.03	160.8 ± 0.1	73.2	264.7
08.735	V	119.6	5.99 ± 0.03	161.8 ± 0.2	73.9	271.8
09.732	V	122.7	6.05 ± 0.03	162.8 ± 0.2	74.2	275.4
10.733	V	125.9	6.05 ± 0.07	162.3 ± 0.3	74.6	279.0
11.730	V	129.1	5.44 ± 0.06	161.4 ± 0.3	74.9	282.5
12.727	V	132.3	5.31 ± 0.09	160.6 ± 0.5	75.3	286.1
13.735	V	135.5	5.23 ± 0.08	161.5 ± 0.4	75.7	289.7

риметром. После исключения фазовой зависимости у них остались вариации степени поляризации во времени с амплитудой около $\Delta P = 0.7\%$. Авторы интерпретируют их как долготную зависимость поляризации, вызванную вариациями в минералогии и/или в структуре поверхности. Однако привязка к центральному меридиану отсутствует, а минимум и максимум поляризации разнесены по долготе всего на 40° .

Таким образом, существование двойной волны в зависимости альбедо поверхности, а следовательно, и степени поляризации от долготы центрального меридиана Меркурия представляется вполне возможным и поэтому проведенные поляриметрические наблюдения Меркурия ставили своей целью ответить на вопрос об их величине и характере.

АППАРАТУРА, МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ

Поляриметрические наблюдения Меркурия проведены в течение трех его видимостей в 2000–2002 гг. на 70-см рефлекторе Чугуевской наблюдательной станции Института астрономии Харьковского национального ун-та. Станция находится на высоте 156 м и расположена в 75 км к юго-востоку от Харькова. Использовался одноканальный фотоэлектрический фотометр-поляриметр, установленный в фокусе Кассегрена ($f/16$), работающий по принципу счета фотонов. Приемником излучения служит мультищелочной фотоумножитель ФЭУ-79. Принцип работы фотометра в режиме поляриметрических измерений основан на быстром вращении поляроида (~ 33 об/с) и квазиодновременной регистрации импульсов в четы-

рех каналах, соответствующих положению углов поляроида 0° , 45° , 90° , и 135° . Такая методика позволяет проводить поляриметрические наблюдения на больших и быстро меняющихся воздушных массах и даже в относительно плохих фотометрических условиях. Регистрация сигнала и первичная обработка результатов измерений осуществляются с помощью компьютера. Для визуального контроля уровня и стабильности сигнала и фона, определения необходимого времени накопления сигнала при требуемой точности измерений и пр. использовался электронный частотомер. В 2000 г. наблюдения Меркурия проводились в узких фильтрах BC (4450/62 Å), GC (5256/57 Å) и RC (7129/62 Å); Поскольку время наблюдений Меркурия ограничено, то для повышения точности наблюдений в 2001–2002 гг. наблюдения проводились только в фильтре GC или в широкополосном фильтре V (5340/770 Å) соответственно. Параметры инструментальной поляризации и нуль-пункт позиционных углов плоскости поляризации определялись в каждую ночь и для каждого фильтра по наблюдениям стандартных звезд с нулевой и большой поляризацией. Величина инструментальной поляризации была небольшой, например, в видимость 2002 г. ее параметры в полосе V составили: $u_i = 0.015 \pm 0.025\%$ и $q_i = 0.130 \pm 0.031\%$.

Наблюдения Меркурия проводились на больших воздушных массах и, следовательно, при невысоком качестве изображений, поэтому была использована фокальная диафрагма с диаметром 33". Фон неба измерялся с этой же диафрагмой. Для ограничения интенсивности потока, с целью сохранения линейности в работе усилителя, входной зрачок телескопа диафрагмировался. Из-за быстрого изменения фона неба и для экономии времени на перевод телескопа с фона неба на Меркурий и обратно, измерения велись по схеме: фон – Меркурий (2 экспозиции) – фон – ... – Меркурий (2 экспозиции) – фон. Длительность единичной экспозиции составляла 15 с. Отсчеты фона в каждом из четырех каналов аппроксимировались полиномом 3 или 4 степени. Затем вычислялись значения фона неба, соответствующие моментам наблюдений Меркурия, которые вычитались из отсчетов для планеты.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты наблюдений Меркурия приведены в табл. 3, где даются: дата и средний момент наблюдений в долях суток, фильтр, фазовый угол α , степень линейной поляризации P и позиционный угол плоскости поляризации θ с их среднеквадратическими ошибками, позиционный угол плоскости рассеяния χ и планетоцентрическая долгота L центра освещенной части наблюдаемого диска

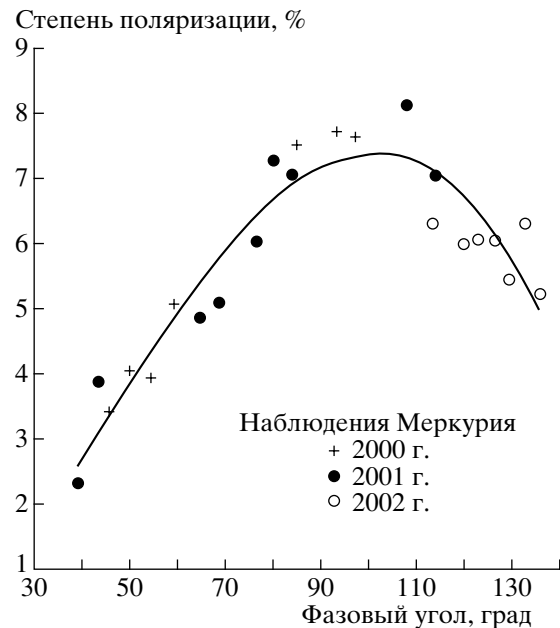


Рис. 1. Составная фазовая зависимость поляризации Меркурия в фильтрах GC (5256/67 Å) и V (5340/770 Å) по результатам наблюдений в 2000–2002 гг. Непрерывная линия соответствует аппроксимации результатов наблюдений полиномом 3 степени.

Меркурия. Долгота L вычислена по формуле Михальчука (Астрономический ежегодник на 2002 г.).

На рис. 1 приведена составная фазовая зависимость поляризации Меркурия для близких фильтров в зеленой области спектра. Сплошная кривая представляет собой аппроксимацию этих наблюдений, выполненную с помощью полинома 3 степени. Очевиден разброс наблюдаемых значений поляризации относительно аппроксимирующей кривой, который достигает 1%, что в несколько раз превосходит ошибки наблюдений. Последнее обстоятельство можно рассматривать как указание на возможное существование долготного эффекта в вариациях степени поляризации по поверхности планеты. На рис. 2 представлена разность измеренной и полученной по аппроксимирующей кривой степени поляризации как функция планетоцентрической долготы центра освещенной части наблюдаемой поверхности Меркурия. Несмотря на то что диапазон наблюдаемых долгот составил около 65° , тем не менее на этом участке долгот четко просматриваются вариации в степени поляризации с амплитудой около 1.5%. В пользу их реальности свидетельствует перекрытие, с точностью до ошибок измерений, данных, соответствующих наблюдениям Меркурия в разные периоды видимости.

Таким образом, результаты проведенных измерений подтверждают эффективность избранной методики поляриметрии Меркурия с целью

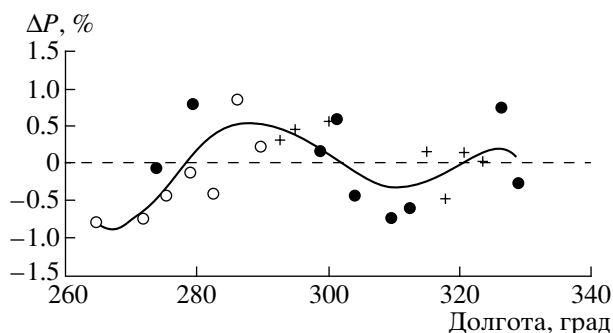


Рис. 2. Зависимость отклонения ΔP между измеренной степенью поляризации и вычисленной по аппроксимационному полиному от долготы центра освещенной части видимого диска Меркурия. Символы такие же, как и на рис. 1.

изучения свойств реголита и их вариаций по поверхности планеты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ опубликованных данных по исследованию свойств реголита поверхности Меркурия показал, что процессы переработки и созревания реголита на поверхности Меркурия должны быть существенно более интенсивными, чем на поверхности Луны. В то же время наблюдаемые интегральные оптические свойства обоих тел, зависящие от степени зрелости реголита (альbedo, цвет, поляризация), очень близки. Это противоречие можно разрешить, если исходить из существенных различий в минералогии исходного (т.е. не переработанного в процессе созревания) вещества поверхностей, о чем свидетельствуют данные Mariner-10 и наземные измерения.

Поляризационные наблюдения Меркурия, выполненные в 2000–2002 гг. позволили обнаружить реальные вариации степени поляризации в диапазоне планетоцентрических долгот центра освещенной части наблюдаемого диска Меркурия 265° – 330° с амплитудой около 1.5%. Для выяснения природы этих вариаций необходимы дополнительные наблюдения в полном диапазоне планетоцентрических долгот Меркурия, которые предполагается провести в ближайшие периоды видимости планеты.

Авторы выражают благодарность Ф.П. Величко и Т.А. Лупишко за помощь в проведении наблюдений и обработки данных.

Работа выполнена при поддержке гранта INTAS–ESA 99-00403.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ксанфомалити Л.В. Физические свойства поверхности Меркурия (обзор) // Астрон. вестн. 2001. Т. 35. № 5. С. 371–386.

- Маров М.Я. Планеты Солнечной системы. М.: Наука, 1986. 320 с.
- Шевченко В.В. Структура поверхности реголита Меркурия по дистанционным данным // Астрон. вестн. 2002. Т. 36. № 5. С. 387–394.
- Bowell E., Zellner B. Polarization of asteroids and satellites // Planets, stars and nebulae studied with photopolarimetry / Ed. Gehrels T. Tucson: Univ. Arizona Press, 1974. P. 381–404.
- Butler B., Muhleman D., Slade M. 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.
- Curtis S.A., Clark P.E., Giles B., et al. JANUS, a proposed pathfinder mission to Mercury // Bull. of AAS. 1998. V. 30. № 3. P. 1111.
- Dollfus A. Observation visuelle et photographique des planètes Mercure et Venus à l'Observatoire du Pic-du-Midi // L'Astronomie. 1953. V. 67. P. 61–75.
- Dollfus A., Auriere M. Optical polarimetry of planet Mercury // Icarus. 1974. V. 23. P. 465–482.
- Gehrels T., Landau R., Coyne G.V. Mercury: Wavelength and longitude dependence of polarization // Icarus. 1987. V. 71. P. 386–396.
- Hapke B., Danielson G.E., Klaasen K., Wilson L. Photometric observations of Mercury from Mariner 10 // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. № 17. P. 2431–2443.
- Hartmann W.K. Relative crater production rates on planets // Icarus. 1977. V. 31. P. 260–276.
- Hunten D.M., Morgan T.H., Shemansky D.E. The Mercury atmosphere // Mercury / Eds Vilas F., Chapman C.R., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1988. P. 562–612.
- Hunten D.M., Sprague A.L. Origin and character of the lunar and mercurian atmospheres // Adv. Space Res. 1997. V. 19. P. 1551–1560.
- Ingersoll A.D. Polarization measurements of Mars and Mercury: Rayleigh scattering in Martian atmosphere // Astron. J. 1971. V. 163. P. 121–129.
- Jackson D.J., Beard D.B. The magnetic field of Mercury // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 2828–2836.
- Langevin Y. The regolith of Mercury: Present knowledge and implications for the Mercury Orbiter mission // Planet. and Space Sci. 1997. V. 45. № 1. P. 31–37.
- Liot B. Recherches sur la polarisation de la lumière des planètes et de quelques substances terrestres // Ann. Observatoire Meudon VIII. 1929. These. Paris, fasc.1.
- Liot B. La polarisation de Mercure comparée à celle de la Lune: Resultats obtenus au Pic-du-Midi en 1930 // Comptes Rendus. Acad. Sci. 1930. V. 29. P. 130.
- Mallama A., Wang D., Howard R. Photometry of Mercury from SOHO / LASCO and Earth. The phase function from 2 to 170° // Icarus. 2002. V. 155. № 2. P. 253–264.
- Matson D.L., Johnson T.V., Veeder G.J. Soil maturity and planetary regoliths: The Moon, Mercury, and the asteroids // Proc. Lunar Sci. Conf. 8th. 1977. P.1001–1011.
- Mitchell D.L., de Pater I. Microwave imaging of Mercury's thermal emission at wavelengths from 0.3 to 20.5 cm // Icarus. 1994. V. 110. № 1. P. 2–32.
- Murray B., Belton M., Danielson G., et al. Mercury's surface: Preliminary description and interpretation from Mariner 10 pictures // Science. 1974. V. 185. P. 170–180.

- Ness N.F., Behannon K.W., Lepping R.P., Whang Y.C.* The magnetic field of Mercury // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 2708–2716.
- Pieters C.M., Fischer E.M., Rode O., Basu A.* Optical effects of space weathering: the role of the finest fraction // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 20817–20824.
- Pike R.J.* Impact craters on Mercury // *Mercury* / Eds Vilas F., Chapman C.R., Matthews M.S. Tucson, Univ. Arizona Press, 1988. P. 165–273.
- Schultz P.H.* Cratering on Mercury: A relook // *Mercury* / Eds Vilas F., Chapman C.R., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1988. P. 274–335.
- Slade M.A., Butler B.J., Muhleman D.O.* Mercury radar imaging: Evidence for polar ice // *Science*. 1992. V. 258. P. 635–640.
- Spudis P.D., Guest J.E.* Stratigraphy and geologic history of Mercury // *Mercury* / Eds Vilas F., Chapman C.R., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1988. P. 118–164.
- Strom R.G.* Mercury // *Encyclopedia of the Solar System* Eds Weissman P.R., McFadden L.-A., Johnson T.V. Acad. Press, 1999. P. 123–145.
- Strom R.G., Neukum G.* The cratering record on Mercury and the origin of impacting objects // *Mercury* / Eds Vilas F., Chapman C.R., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1988. P. 336–373.
- Taylor S.R.* The Moon // *Encyclopedia of the Solar System* / Eds Weissman P.R., McFadden L.-A., Johnson T.V. Acad. Press, 1999. P. 247–275.
- Tholen D.J., Tejfel V.G., Cox A.N.* Planets and Satellites // *Allen's Astrophysical Quantities* (Fourth Edition) / Ed. Cox. A.N. Springer, 1999. P. 293–313.
- Veverka J., Helfenstein P., Hapke B., Goguen J.D.* Photometry and polarimetry of Mercury // *Mercury* / Eds Vilas F., Chapman C.R., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1988. P. 37–58.
- Warell J., Limaye S.S.* Properties of the Hermean regolith: I. Global regolith albedo variation at 200 km scale from multicolor CCD imaging // *Planet. and Space Sci.* 2001. V. 49. №. 14–15. Dec. P. 1531–1552.