

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛУННЫХ ПОРОД,
ДОСТАВЛЕННЫХ АЛС «ЛУНА-16» И «ЛУНА-20»**

Е.Г.Гуськова, Э.С.Горшков, А.В.Иванов, В.И.Почтарев, К.П.Флоренский

Приводятся результаты исследования естественной остаточной намагниченности I_n и магнитной восприимчивости χ для 22 образцов первичных и вторичных лунных пород морского и материкового районов. Повышенные значения магнитных характеристик для вторичных пород по сравнению с первичными могут быть связаны с обогащением металлической фазой за счет привноса метеоритного вещества в период формирования вторичных пород. На поверхности Луны породы с такой остаточной намагниченностью могут создать локальные магнитные аномалии порядка 10–400 γ . Изучение характеристик стабильности I_n приводит к выводу, что стабильная часть I_n первичных пород может иметь термоостаточную природу, I_n вторичных пород связана с процессами шокового метаморфизма на поверхности Луны. Сравнение с литературными данными, известными для лунных пород, доставленных космическими экспедициями «Аполлон», показывает, что результаты магнитных исследований пород из различных районов Луны идентичны.

Природа магнетизма космических тел — один из важнейших вопросов космогонии. Исследования магнитных полей космических тел дают сведения для общей теории эволюции планет Солнечной системы и информацию об особенностях внутреннего строения планет на современном этапе развития. Измерения с помощью автоматических межпланетных станций позволяют судить о магнитных полях Марса, Венеры, Юпитера и обсуждать полученные результаты с позиций различных теорий происхождения магнитного поля.

Сказанное полностью относится и к Луне. Известно, что уже первые измерения (1959 г.) установили отсутствие у Луны собственного дипольного магнитного поля значительной величины [1]. В настоящее время на Землю доставлены образцы лунных пород из 8 различных районов Луны. В плане исследований магнитного поля особенно интересен факт обнаружения естественной остаточной намагниченности практически у всех лунных

образцов. Палеомагнитные методы, основанные на излучении остаточной намагниченности горных пород, позволили установить ряд особенностей магнитного поля Земли в прошлые геологические эпохи. Результаты исследования остаточной намагниченности метеоритов также свидетельствуют о воздействии магнитного поля в период формирования метеоритов в родоначальных телах [2]. Очевидно, и естественная остаточная намагниченность лунных пород связана с влиянием магнитного поля в определенный период развития Луны. Непосредственные измерения напряженности магнитного поля на поверхности Луны дают изменения поля от 16 до 300 γ ; наблюдаемые локальные аномалии обусловлены остаточной намагниченностью окружающих пород и их магнитной неоднородностью [3].

Изучение естественной остаточной намагниченности, магнитной восприимчивости, особенностей процессов намагничивания, стабильности различных видов намагниченности лунных пород, сопоставление данных магнитных измерений на поверхности Луны с магнитными характеристиками пород — один из необходимых этапов исследования магнитного поля Луны.

Нами проводились исследования магнитных свойств лунных пород, доставленных АЛС «Луна-16» и «Луна-20» из морского и материкового районов Луны. Изучению подвергались как образцы мелкой фракции рыхлого обломочного материала — реголита, так и отдельные фрагменты лунных пород.

Реголит морского и материкового районов отличается по цвету: морской — более темный; объемный вес при свободном насыпании практически одинаков — 1,1–1,2 $г/см^3$, в то время как плотность коренных пород Луны составляет около 3,4 $г/см^3$ в морях и около 3,0 $г/см^3$ на материках [4]. Это свидетельствует о рыхлой структуре реголита и значительной его пористости, обусловленной, очевидно, сложной формой частиц реголита и их заметной электризацией. В пробах реголита «Луны-16» и «Луны-20» примерно одинаков максимальный (несколько менее 1 **см**) и средний размер частиц, но в материковом реголите заметно больше крупных частиц; очевидно, материковый реголит относительно менее изменен и переработан.

Частицы реголита могут быть разделены на две основные группы: 1) обломки первичных коренных лунных пород, 2) частицы вторичных пород, сильно измененных под действием процессов на поверхности Луны. В пробах морского реголита первая группа представлена фрагментами пород базальтового типа — мелкозернистыми базальтами и крупнозернистыми породами типа микрогаббро. В пробах материкового реголита коренные лунные породы представлены разнообразными породами анортозитового типа.

Вторичные частицы реголита представлены брекчиями, спекшимися и ошлакованными фрагментами и стеклом различного типа. Брекчии образовались либо в результате уплотнения мелкораздробленного материала реголита под действием ударно-взрывных процессов, либо в процессе спекания раскаленных отложений, выброшенных из ударных кратеров. Соотношение первичных и вторичных частиц различно для морского и материкового реголита — в морском относительное содержание фрагментов вторичных пород заметно выше, чем в материковом, что также говорит о различной степени воздействия ударно-взрывных процессов на породы этих двух районов Луны [5].

Основными минералами лунных пород являются плагиоклазы, пироксены, оливин, ильменит; среди ферромагнитных минералов присутствует самородное или никелистое железо. Содержание ферромагнитных минералов в первичных лунных породах весьма низко, тогда как во вторичных — заметно выше и оценивается в среднем около 1 вес. %, по-видимому, в основном за счет привноса метеоритного металла.

Ниже приводятся некоторые сведения об исследованных фрагментах, полученные на основании наблюдения фрагментов под бинокулярным микроскопом без какой-либо дополнительной препарировки образцов (рис. 1–4). Поэтому эти описания имеют в какой-то степени предварительный характер, особенно в части, касающейся первичных пород материкового района.

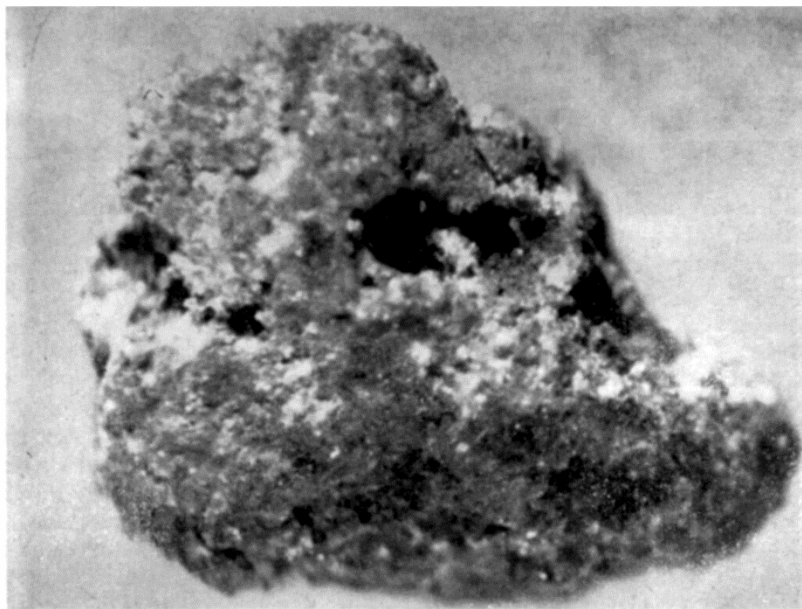


Рис. 1. Частица микрогаббро (1610 – 003) размером 5,3×4,0×3,5 мм

Первичные кристаллические породы морского района из сборов «Луны-16» представлены четырьмя фрагментами пород типа микрогаббро и двумя фрагментами морского базальта. Исследованные фрагменты микрогаббро (1611-001, 1610-003, 1611-013,

1611-024) являются достаточно типичными и сложены плагиоклазом, пироксенами и ильменитом, с редкими кристаллами оливина. Преобладающий размер кристаллов равен 0,1–0,25 *мм*, но в частице 1611-001 отмечаются более крупные кристаллы ильменита размером до 0,5 *мм*. Частица 1611-024 отличается от других заметно большим относительным содержанием плагиоклаза. Частица 1611-013 содержит немногочисленные мелкие поры неправильной формы. В частице 1610-003, кроме того, присутствуют довольно многочисленные более крупные сферические вакуоли диаметром от 0,3 до 1 *мм* с гладкими стекловидными стенками.

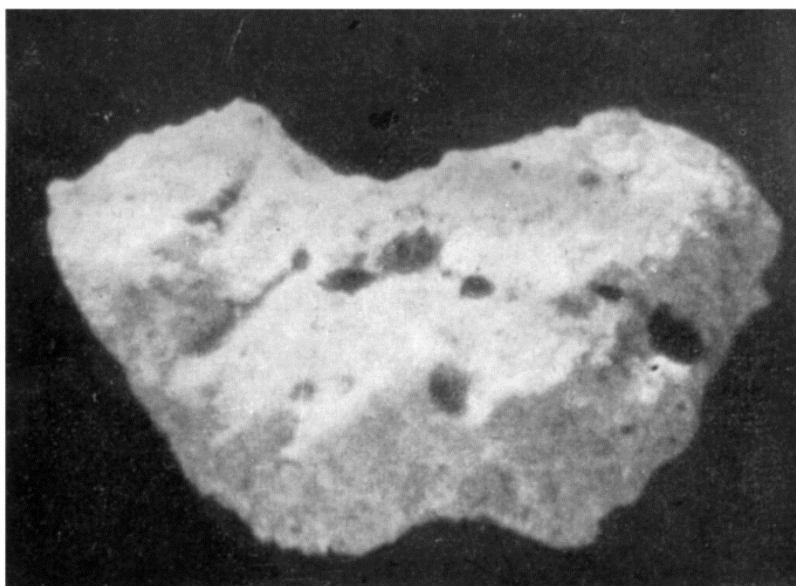


Рис. 2. Частица шпинелевого троктолита (2004 – 010) размером 5,6×3,0×2,5 *мм*

Фрагменты мелкозернистого морского базальта (1610-004, 1611-028) представляют собой остроугольные частицы черно-серого цвета. Один из фрагментов (1610-004) содержит сферические вакуоли диаметром до 0,4 *мм* и поры неправильной формы, поверхность которых покрыта стеклом.

Первичные породы материкового образца представлены четырьмя фрагментами. Частица 2004-010 состоит в основном из плагиоклаза и содержит оливин, а также мелкие включения шпинели, что позволяет отнести ее к шпинелевым троктолитам. Она характеризуется наличием большого количества круглых вакуолей диаметром от менее 0,1 до ~0,5 *мм*. Частица 2004-021 состоит практически целиком из плагиоклаза и относится, видимо, к собственно анортозитам. Она содержит включения металлического железа, в том числе кристалл железа с видимыми размерами порядка 0,25 x 0,65 *мм*, находящийся в полости. Частицы 2004-011 и особенно 2003-019 содержат большие, по сравнению с предыдущими, количества темноцветных минералов. Они предварительно могут быть отнесены к породам анортозитового типа (2004-011) и неморским базальтам (2003-019).



Рис. 3. Частица брекчии (1610 – 005) размером 4,8×3,5×3,3 мм

Изученные фрагменты вторичных пород — реголитовые брекчии и шлаки — как морского, так и материкового реголита в целом по структуре весьма схожи. Частицы брекчий (1610-005, 1610-027, 2002-017, 2002-018, 2006-023), как правило, окатаны, средней плотности. Некоторые из них (1610-027, 2006-023) с одной стороны покрыты стеклянной корочкой.

Частицы шлаков слагаются пористым стеклом черного (1610-006, 1610-026) или темно-серого (2003-022) цвета.

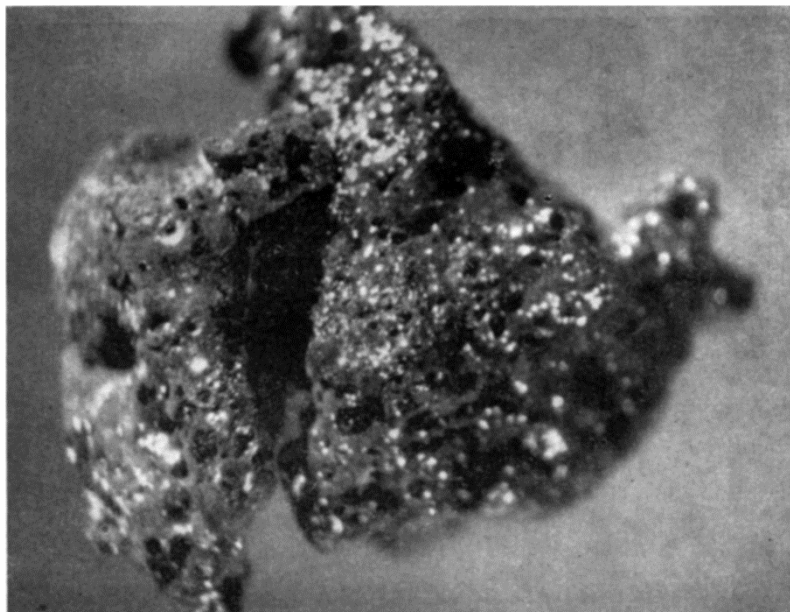


Рис. 4. Частица шлака (1610 – 006) размером 6,0×5,2×4,1 мм

Измерение естественной остаточной намагниченности I_n для малых образцов лунных пород проводилось на магнитометре ИОН-1. Для измерения магнитной восприимчивости χ малого количества вещества был специально сконструирован прибор, обладающий достаточно высокой чувствительностью и основанный на измерении приращения периода колебаний осциллятора при введении в катушку колебательного контура образца породы [6]. По повторным измерениям погрешность оценивается в 5% для I_n и в 10% для χ .

При исследовании образцы мелкой фракции реголита находились в запечатанных стеклянных капсулах, поэтому методика измерений предварительно отработывалась на образцах искусственных аналогов. Аналоги изготавливались из смеси кварцевого песка с порошком никелистого железа метеорита Сихотэ-Алинь или самородного железа чистоты 99,99% [13].

Значения I_n и χ для фрагментов лунных пород и мелкой фракции реголита представлены в табл. 1. Наименьшие значения I_n и χ отмечаются для образцов первичных пород как морского, так и материкового районов (повышенное значение χ для образца 2004-021 связано с крупным включением металла). Для вторичных пород значение I_n их увеличивается в ~10–15 раз для образцов «Луны-16» и в 2–5 раз — для образцов «Луны-20» по сравнению со значениями для первичных пород. Увеличение значений χ отражает факт обогащения образцов брекчий и шлаков металлической фазой, очевидно, за счет привноса метеоритного вещества. Отношения средних значений χ вторичных пород к χ первичных равны ~10 и 5 для морского и материкового районов соответственно, т. е. степень обогащения вторичных пород морского района выше, что согласуется с большей переработанностью поверхностного слоя, установленной по морфологическим признакам [5].

Следует отметить, что при увеличении χ вторичных пород морского района в ~2 раза по сравнению с χ вторичных пород материкового района значение I_n возрастает в 4 раза. Это может свидетельствовать о различном механизме образования I_n вторичных пород морского и материкового районов.

При предварительном изучении лунных пород было высказано предположение, что по минералогическому и химическому составу лунные породы близки к полевошпатовым ахондритам — особому типу каменных метеоритов, содержание никелистого железа в которых составляет 1–3 вес. % [7]. Ранее нами изучались магнитные свойства для 5 образцов таких ахондритов; значения I_n и χ для них представлены в табл. 2 [8]. Как видно, I_n изменяется в пределах $(0,4–1,5) \times 10^{-3}$ сгс, χ — в пределах $(0,7–2,8) \times 10^{-3}$ сгс, т. е. магнитные характеристики по порядку величины близки к лунным породам, по значению χ ахондриты приближаются к вторичным лунным породам, а по значению I_n — к первичным,

что может свидетельствовать о различии процессов образования намагниченности ахондритов и лунных пород.

Среди земных пород — аналогов лунным породам по типу и содержанию ферромагнитного минерала не встречается, поэтому трудно даже качественно сравнить магнитные свойства лунных и земных горных пород.

**Естественная остаточная намагниченность I_n и магнитная восприимчивость χ образцов
первичных и вторичных лунных пород**

«Луна-16»					«Луна-20»				
№ образца	Тип породы	Вес, мг	$I_n \times 10^3$, сгс	$\chi \times 10^3$, сгс	№ образца	Тип породы	Вес, мг	$I_n \times 10^3$, сгс	$\chi \times 10^3$, сгс
Первичные породы									
1611-001	микрогаббро	88	0,65	0,39	2004-010	шпинелевый троктолит	57,7	0,65	0,38
1610-003	»	104	0,02	—	2004-011	порода анортозитового типа	38,4	1,2	0,76
1610-004	морской базальт	58,8	0,06	—	2003-019	неморской базальт	104	0,10	0,63
1611-013	микрогаббро	51,1	0,35	0,65	2004-021	анортрозит с включением металла	9	0,25	7,15
1611-024	»	119	0,11	0,56					
1611-028	морской базальт	31	0,62	1,10					
Вторичные породы									
1610-005	брекчия	58,2	5,1	4,9	2002-017	брекчия	70	0,8	2,69
1611-025	»	58,5	15,3	5,8	2002-018	брекчия	90	1,0	2,10
1610-027	брекчия (оплавлен)	58	6,4	4,7	2003-023	брекчия (оплавлен)	59	1,25	2,15
1610-006	шлак	84	5,8	5,1	2003-022	шлак	35,5	1,2	2,69
1610-026	»	47	2,0	6,7					
Реголит									
1603-2п	размер частиц <0,083 мм	175,3	—	10,3					
1609-1с	То же	188,1	—	9,7					
1603-5а	размер частиц 0,083–0,127 мм	169,6	—	9,2	—	—	—	—	—

Естественная остаточная намагниченность I_n и магнитная восприимчивость χ богатых Са полевошпатовых ахондритов

Наименование	Тип	$I_n \times 10^3, \text{сгс}$	$\chi \times 10^3, \text{сгс}$
Павловка	говардит	1,4	2,8
Юртук	говардит	1,5	1,8
Juvinas	эвкрит	0,8	2,3
Luotolax	говардит	1,4	2,0
Stannern	эвкрит	0,4	0,7

Увеличение значений χ для образцов мелкой фракции реголита по сравнению с фрагментами первичных и вторичных пород морского района (табл. 1) также, по-видимому, является следствием обогащения металлической фазой в период формирования реголита.

Полученные нами значения I_n сравнивались со значениями, имеющимися в литературе для лунных пород, доставленных космическими экспедициями «Аполлон-11», «Аполлон-12», «Аполлон-14» и «Аполлон-15» [9–11]. На рис. 5 представлены гистограммы распределения I_n первичных и вторичных пород различных районов Луны. Сравнение показывает, что I_n изменяется в достаточно широких, но одинаковых пределах 10^{-6} – 10^{-3} сгс. Отметим, что породы с такой остаточной намагниченностью могут создавать на поверхности Луны локальные магнитные аномалии порядка 10–400 γ , что согласуется с данными прямых измерений магнитного поля как на поверхности Луны [12], так и на высоте ~110 км [3]. Для изучения остаточной намагниченности и ее природы часть образцов подвергалась размагничиванию переменным магнитным полем. На рис. 6 представлены кривые размагничивания I_n для различных образцов, а в табл. 3 — основные характеристики стабильности I_n . Вид кривых размагничивания свидетельствует о сложном характере намагниченности лунных пород. Пределы изменения эффективного размагничивающего поля \tilde{H}_0 , т. е. поля, уменьшающего первоначальное значение намагниченности в отношении $1/e$, для первичных пород составляет 240–450 э, для вторичных — 60–100 э. Укажем для сравнения, что для лунных пород, доставленных космическими экспедициями «Аполлон», значения \tilde{H}_0 находятся в пределах 8–145 э для первичных пород (7 образцов) и в пределах 8–48 э — для вторичных (5 образцов).

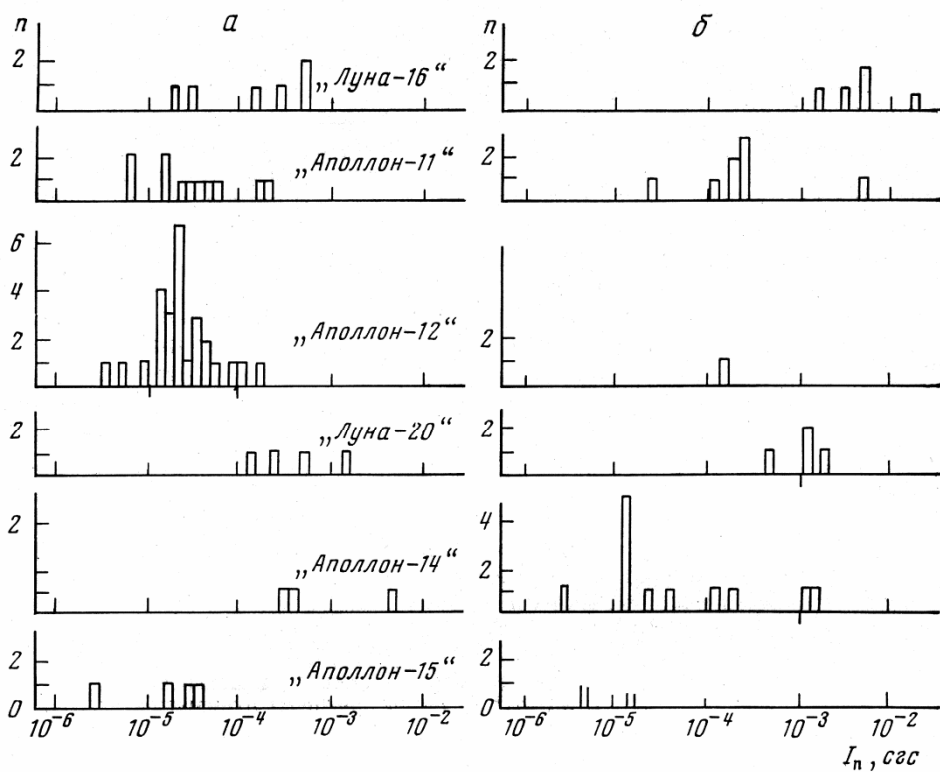


Рис. 5. Гистограммы распределения I_n первичных (а) и вторичных (б) пород, доставленных АЛС «Луна-16» и «Луна-20» и космическими экспедициями «Аполлон»

Среди микробрекчий «Аполлона-11» обнаружено два образца с необычно стабильной I_n (10048,55 и 10085,13 [10]), для которых \dot{H}_0 достигает 400 и 1400 э соответственно.

Стабильная часть естественной остаточной намагниченности $I_{ст}$ для двух образцов первичных пород «Луны-16» и «Луны-20» составляет 0,7 и 0,5 от I_n и по величине достигает значения $0,46 \times 10^{-3}$ и $0,37 \times 10^{-3}$ *сгс* (табл. 3). Для 8 образцов вторичных пород стабильная часть $I_{ст}$ составляет 0,15–0,35 от I_n и по величине достигает значений $(0,16–4,9) \times 10^{-3}$ *сгс*. Первичные породы обладают более стабильной остаточной намагниченностью, по виду кривых можно говорить о наличии по крайней мере двух различных по стабильности видов намагниченности и о возможной термоостаточной природе стабильной части I_n . Остаточная намагниченность вторичных пород менее стабильна.

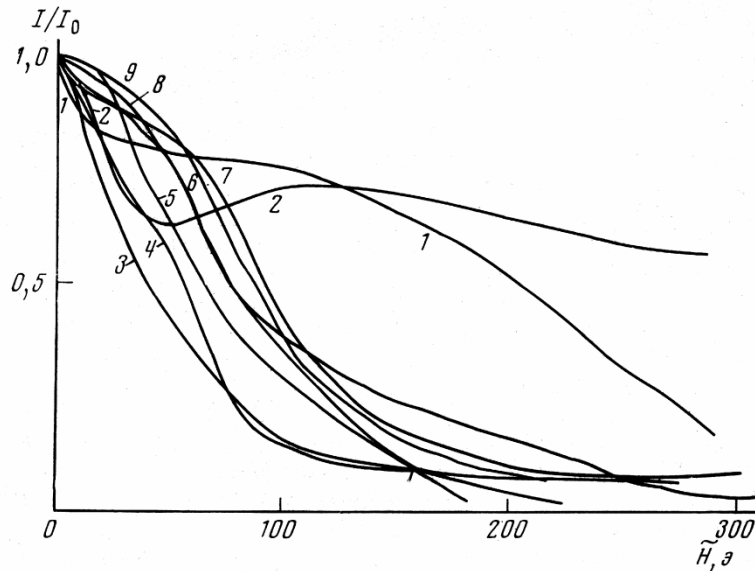


Рис. 6. Кривые размагничивания переменным магнитным полем I_n первичных (1, 2) и вторичных (3–9) лунных пород
 1 – 1611–001; 2 – 2004–010; 3 – 1610–026; 4 – 1610–0,17; 5 – 1610–022;
 6 – 1610–025; 7 – 2002–027; 8 – 2003–006; 9 – 1610–005

Таблица 3

Характеристики стабильности естественной остаточной намагниченности лунных пород

№ образца	$I_n \times 10^3$, сгс	\tilde{H}_0 , э	I_{cm} / I_n	$I_{cm} \times 10^3$, сгс	h , э	H_{\square} , э	\tilde{H} , э
1611-001	0,65	240	0,70	0,46	—	—	—
2004-010	0,65	>400	0,57	0,37	—	—	—
1610-005	5,1	105	0,22	1,1	40	1,1	200
1610-025	15,3	110	0,32	4,9	75	3,5	180
1610-027	6,4	105	0,17	1,1	37	1,5	150
1610-006	5,8	100	0,15	0,9	45	1,0	200
1610-026	2,0	65	0,25	0,5	—	—	—
2002-017	0,8	65	0,20	0,16	—	1,0	100
2002-018	1,0	—	0,35	0,35	—	—	—
2003-022	1,2	85	0,15	0,18	31	1,0	200

Отмеченное выше соотношение между значениями I_n вторичных пород морского и материкового районов остается таким же и для стабильной части I_n , т. е. при увеличении \square в ~ 2 раза среднее значение I_{cm} возрастает в 4 раза.

Полученные кривые размагничивания I_n лунных пород сравнивались с кривыми размагничивания для различного вида намагниченностей, искусственно воспроизведенных

на тех же образцах. Поскольку нагрев образцов на данном этапе не предполагался, моделировались такие виды намагниченности, как нормальная, идеальная, вязкая. Оказалось, что эти намагниченности обладают большим временным спадом; это создало определенные трудности в постановке эксперимента и дальнейшей интерпретации результатов.

На рис. 7 представлены кривые размагничивания I_n и искусственно созданных нормальной и идеальной намагниченностей.

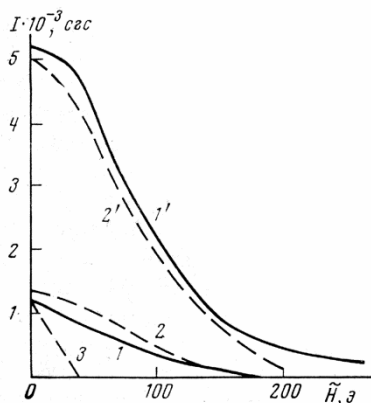


Рис. 7. Кривые размагничивания переменным магнитным полем I_n и искусственно созданных намагниченностей

1, 2, 3 — для образца 2003—022 кривые размагничивания I_n , идеальной при $\bar{H}=1,0$ э и $\bar{H}=200$ э и нормальной при $\bar{H}=31$ э; 1', 2' — для образца 1610—005 кривые размагничивания I_n и идеальной при $\bar{H}=1,5$ э и $\bar{H}=200$ э

Нормальная намагниченность, равная по величине I_n лунных пород, достигается в постоянных магнитных полях h порядка 30–75 э (табл. 3). Такая оценка для вторичных пород, доставленных космическими экспедициями «Аполлон», дает значение 8–50 э [9]. Нормальная намагниченность и снимается в тех же полях, в которых создана, т. е. 30–75 э; естественная же остаточная намагниченность лунных пород исчезает в полях, значительно больших. Для оценки возможности намагничивания лунных пород в постоянном магнитном поле в период доставки их на Землю или в приемной лаборатории было проведено изучение структуры и величины магнитного поля в приемной камере, в капсулах и бурах «Луны-16» и «Луны-20». Оказалось, что значения постоянных магнитных полей указанных объектов не превышают 5–7 э и существенного влияния на намагниченность лунного вещества оказать не могут. Очевидно, нет оснований предполагать, что остаточная намагниченность исследованных образцов может быть намагниченностью типа нормальной в сильных полях.

Моделирование идеальной намагниченности показывает, что возможно такое сочетание постоянного H_{\square} и переменного \tilde{H} магнитных полей, при котором полученная идеальная намагниченность по величине и стабильности будет соответствовать остаточной намагниченности I_n данного образца. Результаты моделирования, проведенного на

6 образцах, дают для H_{\square} значения 1,0–1,5 э и для \dot{H} — 100–200 э (табл. 3). Как видно из рис. 7, таким образом может быть осуществлено почти точное воспроизведение остаточной намагниченности по величине и стабильности, что свидетельствует о связи I_n вторичных пород с процессами шокового метаморфизма, в результате которого могла возникнуть намагниченность типа динамической, по характеристикам стабильности близкой к идеальной намагниченности. Оценка величины намагничивающего поля Луны в период формирования брекчий пока затруднительна без соответствующего моделирования. В данной статье не приводятся результаты моделирования вязкой намагниченности I_{rv} на образцах лунных пород, поскольку I_{rv} обладает рядом особенностей, которые должны стать предметом специального обсуждения.

Выводы

1. Естественная остаточная намагниченность I_n и магнитная восприимчивость \square первичных и вторичных пород, доставленных АЛС «Луна-16» и «Луна-20», изменяется в пределах 10^{-5} – 10^{-3} сгс. Значения I_n и \square для вторичных пород и морского и материкового районов выше по сравнению со значениями для первичных пород, что может быть связано с обогащением вторичных пород металлической фазой за счет привноса метеоритного вещества в период их образования.

На поверхности Луны породы с такой остаточной намагниченностью могут создать локальные магнитные аномалии порядка 10–400 γ .

Сравнение со значениями I_n , известными по литературным данным для лунных пород, доставленных космическими экспедициями «Аполлон», показывает, что пределы изменения I_n одинаковы для различных районов Луны.

2. Кривые размагничивания I_n в переменном магнитном поле и значения эффективного размагничивающего поля \dot{H}_0 свидетельствуют о том, что I_n первичных пород более стабильна; это дает основание предположить термоостаточную природу стабильной части I_n первичных пород.

3. Результаты моделирования различных видов намагниченности показывают, что I_n вторичных пород по величине и стабильности может быть представлена идеальной намагниченностью, созданной при сочетании постоянного $H_{\square} = 1$ э и переменного $\dot{H} = (100–200)$ э магнитных полей; это говорит о возможной связи I_n вторичных пород с процессами шокового метаморфизма.

Палеомагнитные оценки поля Луны пока затруднительны и требуют дополнительных исследований. По литературным данным такие оценки поля дают значения от 800 до 5000 γ [10, 14].

Дата поступления

12 марта 1974 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *С.Ш.Долгинов, Е.Г.Ерошенко, А.Н.Жузгов, Н.В.Пушков.* Геомагн. и аэрономия, 1, №1, 21, 1961.
2. *Е.Г.Гуськова.* Магнитные свойства метеоритов. Л., «Наука». 1972.
3. *P.I.Colleman, Ir.B.R.Lichtenstein, C.T.Russel, L.B.Sharp, G.Schubert.* Proc. 3 Lunar Sci. Conf., 3, 2271, 1972.
4. *В.Ф.Вольшец, К.П.Флоренский, А.В.Иванов.* Сб. «Лунный грунт из Моря Изобилия». М., «Наука», 1974, стр. 54.
5. *Л.С.Тарасов, К.П.Флоренский, А.В.Иванов, О.Д.Родэ.* Геохимия. №9, 1275, 1973.
6. *С.П.Бакалинский, А.Я.Ротштейн.* Геофизическая аппаратура, вып. 51, 1973.
7. *А.П.Виноградов.* Геохимия. №1, 3, 1970.
8. *Э.С.Горшков, Е.Г.Гуськова, В.И.Почтарев.* Космич. исслед., 10, №5, 760, 1972.
9. *T.Nagata, R.M.Fisher, F.C.Schwerer.* Moon, 4, 160, 1972.
10. *T.Nagata, B.M.Fisher, F.C.Schwerer, M.D.Filler, J.R.Dunn.* Proc. 3 Lunar Sci. Conf., 3, 2423, 1972.
11. *D.W.Strangway, G.W.Pearce, W.A.Gose and R.W.Timme.* Earth and Planet. Sci. Letters, 13, №1, 43, 1971.
12. *Palmer Dyal, Curtis W. Parkin.* Proc. 2 Lunar Sci. Conf., 3, 2391, 1971.
13. *E.S.Gorshkov, E.G.Gus'kova and V.I.Pochtarev.* Space Research, 12, Academie — Verlag, Berlin, 1972, p. 83.
14. *Charles E. Helsley.* Proc. 2 Lunar Sci. Conf., 3, 2485, 1971.