

Член-корреспондент АН СССР П. Н. КРОПОТКИН

ИЗОСТАЗИЯ И РЕЛЬЕФ ЗЕМЛИ, ЛУНЫ И МАРСА

Изостатические соотношения между высотой рельефа и толщиной или плотностью коры (¹) должны иметь универсальное значение в космических телах такого типа, как Земля, Марс и Луна. Судя по имеющимся подсчетам (^{2, 3}), на глубине 60—300 км в них существуют слои с температурой $>1000^\circ$ и вязкостью, достаточно низкой для того, чтобы в течение геологического времени (10^5 — 10^8 лет) на этих уровнях повсеместно устанавливалось почти одинаковое гидростатическое давление. Коэффициент изостатической компенсации рельефа Земли (с учетом слоя воды в океанах) составляет в среднем на суше 91%, на морях и океанах 99% (^{1, 4}). Сопоставление гравиметрических и сейсмологических данных подтверждает (с отклонениями $\sim 10\%$) справедливость схемы Эри: толщина коры тем больше, чем выше уровень рельефа (⁵⁻⁷).

В соответствии с принципами изостазии двум типам земной коры — океаническому (тонкая базальтовая кора) и материковому (мощная кора; верхние 10—20 км составляет гранитный слой и продукты его разрушения — осадочные породы) — отвечают два максимума на кривой частоты встречаемости уровней. Они различаются между собой на 4900 м. На рис. 1 гипсометрическая кривая пересчитана, согласно принципу изостазии, к тому уровню, который имело бы дно океанов при отсутствии воды. В этом случае, подобно поднятию Фенноскандии после удаления ледникового покрова, произошел бы общий подъем дна океанов. Разность уровней двух максимумов $\Delta H = H_1 - H_2$ сократилась бы до 3100 м, разность Δh между уровнем наиболее высоких гор ($h_1 = 8$ км) и глубоких впадин ($h_2 \sim -10$ км) уменьшилась бы с 18 до 14,3 км (⁸).

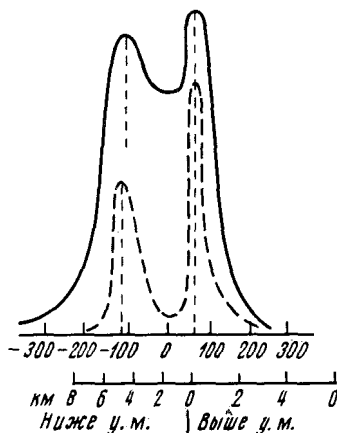
Гравиметрия Луны, известная из анализа движения искусственных спутников (^{9, 10}), показывает, что аналогичные соотношения в общем справедливы и для Луны (^{8, 11, 12}). Обращает на себя внимание сходство в величинах ΔH (разность уровней главных максимумов 3040 м), Δh (11—12 км) и диапазона аномалий Буге ($\Delta g_{\max} - \Delta g_{\min} = 820$ мгл) Луны и Земли ($\Delta H = 3100$ м, $\Delta h = 14,3$ км, $\Delta g_{\max} - \Delta g_{\min} = 950$ мгл). Максимумы силы тяжести в редукции Буге приурочены на Луне к круглым депрессиям морей Дождей, Ясности и Нектара и связаны с неглубоким залеганием плотных ультраосновных пород подкорового слоя (¹⁴). Базальты таких морей представляют собой материал, по составу близкий к ультраосновным породам. Они существенно отличаются от пород, богатых Al, которые отмечены на возвышенностях (^{3, 13}). Вполне возможно, что кора под возвышенностями Луны имеет средний состав, близкий к составу андезитов или диоритов — пород менее плотных, чем базальты лунных морей.

Обращаясь к Марсу, можно убедиться, что здесь амплитуда высот рельефа Δh такая же, или еще большая, чем на Земле. Радарные измерения на 15 участках, расположенных между экватором и 10° с. ш., обнаружили разность высот $\Delta h = 13,3$ км. На протяжении 800 км от светлой области Aeria к темной области Syrtis Major уровень снижается на 6,1 км, от светлой области Xanthe к темной Meridiani Sinus — на 1,6 км (¹⁴). Разность высот на локационном профиле вдоль 21° с. ш. достигает 12,5 км. Высшие точки профиля лежат в центре крупнейшей светлой области Arcadia — Amazonis и в средних частях светлых экваториальных областей

Aeria — Arabia и Elysium. Низшие пункты находятся у окраины обширного моря Mare Acidalium ⁽¹⁵⁾.

По флуктуациям в мощности радиосигналов «Маринера-4» при его прохождении за Марсом было найдено, что светлая область Electris в южном полушарии имеет уровень на 5 км более высокий, чем темное Mare Acidalium в северном полушарии ⁽¹⁶⁾. Определения оптической толщины атмосферы показывают, что в общем темные «моря» Марса расположены ниже среднего уровня светлых «материков» ⁽³⁾. Территории с высотой

Рис. 1. Гипсометрические кривые Луны (сплошная линия, по П. Хедервари ⁽¹²⁾; высота рельефа выражена в сотысячных долях лунного радиуса) и Земли (прерывистая линия). Земная кривая показана с пересчетом глубины впадин к тому уровню, на котором в случае отсутствия воды находилось бы дно океанов после соответствующего изостатического поднятия



более 15 км, подсчитанной по интенсивности полос поглощения CO_2 , приурочены главным образом к светлым областям (Hesperia, Elysium, Arcadia, Aeria ^(17, 18)). В то же время, в локальных масштабах наблюдается обратная зависимость, а именно приуроченность светлого материала к пониженным участкам (район Meridiani Sinus ⁽¹⁹⁾). Это связано, вероятно, с переносом пыли из обширных светлых возвышенностей в депрессии.

Математический анализ частоты встречаемости уровней на профиле по 21° с. ш. и другие данные показывают, что гипсометрическая кривая Марса совершенно не соответствует гауссовской кривой случайного распределения и скорее свидетельствует о существовании двух резко выраженных максимумов, может быть аналогичных материковому и океаническому максимумам Земли ⁽²⁰⁾. Принцип изостазии позволяет утверждать, что при большой амплитуде вариаций уровня рельефа ($\Delta h \geq 13$ км, $\Delta \rho \sim 5$ км) коровый слой Марса должен значительно варьировать по толщине или плотности.

Имея в виду, что менее плотные, кислые по своему составу магматические породы известны в солнечной системе не только в граничном слое Земли, но также и среди метеоритов (тектиты), можно предположить их присутствие и на Марсе. Светлые «материковые» возвышенности (Amazonis — Arcadia — Tractus albus, Aeria — Arabia, Elysium, Electris), по всей вероятности, сложены менее плотными лейкократовыми породами; это могут быть породы гранитного типа и светлые продукты их разрушения (кварц, полевые шпаты и пр.). Отсутствие крупных кратеров (вероятно, имеющих вулканическое происхождение) в светлых бесструктурных областях ^(21, 22) находит себе в этом случае естественное объяснение. Благодаря большей вязкости кислая магма, по сравнению с основной, чаще образует интрузивные тела, и реже — вулканические постройки.

Распространение темного материала на Марсе, по-видимому, связано с поясами базальтового, основного вулканизма, поставляющего меланократовые породы. Типичные темные области (Hellas, Mare Australe) характеризуются широким распространением средних и крупных, вероятно вулканических, кратеров. Для некоторых темных областей (Mare Acidalium, Syrtis Major) указывается низкое гипсометрическое положение. То

же отмечается для областей с хаотическим чередованием неправильных хребтов и впадин, которые несут черты сбросовой тектоники ⁽²¹⁾.

Таким образом, основываясь на принципе изостазии и на резких различиях в уровне рельефа и в характеристиках отражательной способности и вулканизма, можно предполагать, что на Марсе существует деление поверхностного слоя на два типа структур, аналогичных земным — области с менее плотной, предположительно гранитной корой (светлые возвышенности) и области с корой более плотной, сформированной, вероятно, при процессах базальтового вулканизма (депрессии некоторых морей).

Отклонения от изостазии, достигающие 50—300 мгл, связаны на Земле с активными тектоническими процессами в поясах кайнозойской складчатости, на островных дугах и в океанических желобах ⁽⁴⁾. Гравиметрическая карта Луны ⁽⁹⁾ показывает такие же, по масштабу и градиентам, изостатические аномалии. От минимума у хребта Юра до максимума в центре моря Дождей сила тяжести возрастает на 290 мгл (на расстоянии 560 км), от Апеннин к центру моря Дождей — на 260 мгл (на 450 км); от минимума, расположенного севернее моря Ясности, к максимуму в центре этого моря на 250 мгл (на 600 км) и от минимума в хребте Гемус до максимума в море Ясности — на 260 мгл (на расстоянии 460 км). Поскольку на такой большой площади, как гравиметрически охарактеризованная часть Луны (~ 10 млн км²), в целом должна иметь место изостатическая компенсация рельефа, оказывается необходимым изменить принятый Мюллером и Сьогреном ⁽⁹⁾ нуль отсчета по крайней мере на 20 мгл. В результате максимальные положительные аномалии («масконы») снижаются до +240 и +160 мгл, а отрицательные аномалии дугообразных хребтов, окаймляющих круглые депрессии масконов, возрастают до —95 (хребет Гемус), —40 (Кавказ), —80 мгл (Юра). Вся картина распределения аномалий, депрессий и хребтов приобретает при такой корректировке определенное сходство с тем, что известно в Средиземноморье, Индонезии и других районах кайнозойской складчатости. Земные «масконы» наблюдаются в депрессиях Эгейского, Тирренского морей, Венгерской низменности, морей Банда и Сулу, а зоны дугообразных отрицательных изостатических аномалий — вблизи них ^(8, 10).

Геологический институт
Академии наук СССР
Москва

Поступило
17 II 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. Н. Люстих, Тр. Инст. физ. Земли, 38 (165) (1957). ² Е. А. Любимова, Термика Земли и Луны, «Наука», 1968. ³ Физика Луны и планет, сборн. статей, «Наука», 1972. ⁴ М. Е. Артемьев, Изостатические аномалии силы тяжести и некоторые вопросы их геологического истолкования, «Наука», 1966. ⁵ Г. З. Гурарий, И. А. Соловьева, Строение земной коры по геофизическим данным. Изд. АН СССР, 1963. ⁶ Н. Б. Сажина, Н. П. Грушинский, Гравитационная разведка, М., 1966. ⁷ G. P. Woollard, J. Geophys. Res., 64, № 10, 1521 (1959). ⁸ П. Н. Кропоткин, Геотектоника, № 1, 3 (1971). ⁹ P. M. Müller, W. L. Sjogren, Science, 161, № 3842 (1968). ¹⁰ W. M. Kaula, Phys. Earth. and Planet. Interiors, 2, № 2 (1969). ¹¹ J. A. O'Keef, Science, 162, № 3860, 1405 (1968). ¹² Фигура Луны и проблемы лунной топографии, сборн. статей, «Наука», 1968. ¹³ E. D. Jackson, H. G. Wilshire, J. Geophys. Res., 73, № 24, 7621 (1968). ¹⁴ New Radar Map, Nature, 223, № 5206, 562 (1969). ¹⁵ G. H. Pettengil, C. C. Counselman, Astron. J., 74, 461 (1969). ¹⁶ Science News, 89, 418 (1966). ¹⁷ M. J. Belton, D. M. Hunten, Science, 166, № 3902, 225 (1969). ¹⁸ R. A. Wells, Science, 166, № 3907, 862 (1969). ¹⁹ J. A. Cutts, L. A. Soderblom, J. Geophys. Res., 76, № 2, 343 (1971). ²⁰ П. Н. Кропоткин, Геотектоника, № 5 (1971). ²¹ R. P. Sharp, L. A. Soderblom, J. Geophys. Res., 76, № 2, 331 (1971). ²² R. B. Leighton, Scient. Am., 222, № 5, 27 (1970).