

С. В. КОЗЛОВСКАЯ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ И СОСТАВА ЗЕМНЫХ ПЛАНЕТ И СПУТНИКОВ

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 5 VIII 1953)

1. Особенности химического состава вещества планет и спутников тесно связаны с вопросом об их происхождении. Согласно теории О. Ю. Шмидта ⁽¹⁾ планеты образовались из холодных пылевых частиц протопланетного облака. В процессе эволюции этого облака возникло различие в составе и количестве пылевого вещества на различных расстояниях от Солнца.

Планеты земной группы и их спутники, образовавшиеся из внутренней части протопланетного облака, должны иметь сходный состав. Расчеты Джеффриса ⁽²⁾, основанные на гипотезе о железном ядре Земли, привели его к выводу о непонятных различиях в составе земных планет. Б. Ю. Левин ⁽³⁾ сделал попытку согласовать гипотезу о железном ядре Земли с гипотезой о едином составе планет земной группы и Луны, считая, что различия плотностей обусловлены только различием в давлениях в недрах этих тел. Но в таком случае возникали новые трудности, состоящие в том, что получалась слишком малая плотность силикатной части. Вообще, в результате последних исследований аргументы в пользу гипотезы о железном ядре Земли потеряли силу и, наоборот, перед нею встало много затруднений.

Все большее распространение получает идея, высказанная впервые В. Н. Лодочниковым ⁽⁴⁾ о том, что вещество ядра и оболочки Земли химически однородно, и скачок плотности на границе ядра обусловлен фазовым превращением вещества под действием высокого давления, а не появлением нового вещества, как например, железа. Расчеты внутреннего строения земных планет, произведенные Рамзеем ⁽⁵⁾ и Булленом ⁽⁶⁾ на основе этой гипотезы о природе земного ядра, указывают на единство состава планет земной группы. Однако остаются небольшие расхождения, связанные, главным образом, с тем, что распределение плотности в Земле, на которое опираются в расчетах, до сих пор окончательно не установлено, так как астрономические данные и данные о распределении скоростей сейсмических волн недостаточны для однозначного решения вопроса. Параллельный детальный расчет распределения плотностей в планетах земной группы и Луны может позволить уточнить распределение плотности в Земле.

2. Отклонения от гидростатического равновесия, имеющие место внутри планет, несущественны. Поэтому для расчета внутреннего строения планет можно воспользоваться уравнениями гидростатического равновесия:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \rho, \quad \frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho, \quad (1)$$

где p — давление и ρ — плотность на расстоянии r от центра планеты, M_r — масса внутри сферы радиуса r , G — постоянная тяготения. Граничные условия имеют вид:

$$\text{для } r = R_0 \quad M = M_0; \quad \text{для } r = 0 \quad M = 0, \quad (2)$$

где M_0 и R_0 — масса и радиус планеты.

Если планета состоит из однородного, недифференцированного вещества, изменение плотности вдоль ее радиуса будет обусловлено только сжатием вещества. Уравнения (1) и (2) позволяют определить изменение давления и плотности вдоль радиуса планеты, если известно уравнение состояния для вещества, слагающего планету:

$$\rho = \rho(p). \quad (3)$$

Однако в недрах планет господствуют такие высокие давления, которые недоступны эксперименту, и зависимость плотности от давления неизвестна. Но поскольку планеты земной группы должны иметь единый состав, то при расчетах их внутреннего строения можно исходить из данных о внутреннем строении и составе Земли. Считая, что земное ядро является не следствием гравитационной дифференциации железа и силикатов, а следствием фазового превращения вещества под действием высокого давления, мы можем зависимость плотности от давления, построенную на основании предполагаемого распределения плотности вдоль радиуса Земли, принять за «уравнение состояния вещества Земли». Если такая гипотеза о земном ядре правильна, то, рассчитывая с помощью этого «уравнения состояния» и уравнений (1) и (2) модель тела с радиусом Луны и Марса, мы получим правильное значение средних плотностей этих тел.

Иначе обстояло бы дело, если бы действительно существовало железное ядро. Тогда изменение плотности вдоль радиуса Земли происходило бы в результате изменения давления и вследствие изменения химического состава. Поверхностные слои Земли были бы «облегчены» по сравнению со средним составом недифференцированного вещества, а центральные части — значительно утяжелены. Мы получили бы значительные значения для средних плотностей Луны и Марса, так как в этих расчетах используются данные о плотности в Земле только до 180 км глубины для Луны и до 700 км для Марса, т. е. мы строили бы модели из сильно облегченных поверхностных слоев Земли. В то же время, независимо от того, произошла или нет дифференциация Луны и Марса, все железо, имеющееся в недрах этих тел, отражено в их наблюдаемой средней плотности.

В уравнении (3) плотность ρ , вообще говоря, зависит не только от давления, но и от температуры. Однако, вследствие малости объемного коэффициента термического расширения для горных пород (в особенности при высоких давлениях), различие температур на несколько тысяч градусов вдоль радиуса одной планеты, или в недрах различных планет, изменило бы плотность лишь на доли процента.

В настоящей работе уравнения (1) численно интегрировались методом Рунге от поверхности к центру. Результат интегрирования можно изобразить графически как зависимость M_r от r , и для внутренне-непротиворечивой модели кривая должна пройти через начало координат.

Для расчета распределения плотности надо знать M_0 и R_0 , которые известны недостаточно точно. Мы принимаем значения масс, найденные Рабэ (7), и значения радиусов, приведенные Койпером (8). В качестве уравнения состояния вещества, из которого построены планеты земной группы и Луна, мы в первом приближении берем два варианта зависимости плотности от давления, найденные Рамзеем (9) и Булленом (10) на основе астрономических и сейсмических данных.

3. Астрономические и сейсмические данные не позволяют однозначно определить распределение плотности в Земле. Им удовлетворяет целый ряд кривых распределения плотности, заметно отличаю-

щихся друг от друга. Сравнительный анализ внутреннего строения Луны, Марса и Венеры, проводимый на основе гипотезы об их едином составе, позволяет уточнить распределение плотности в Земле, так как различные кривые распределения дают различное расхождение с фактическими данными об этих телах.

Кривая $\rho(r)$, построенная по данным Буллена для Земли, позволяет рассчитать точную модель Луны. При использовании кривой $\rho(r)$ Рамзея получается расхождение с наблюдательными данными, которое может быть устранено, если в зависимости $\rho(r)$ (по данным Рамзея) увеличить все ρ примерно на 1% (в используемом интервале давлений) и затем построить новую зависимость $\rho(r)$. Это эквивалентно перестройке распределения плотности в верхних слоях Земли до глубины 180 км.

Для Марса кривая $\rho(r)$ Рамзея дает заметное расхождение с фактическими данными при обычно принимаемом значении его радиуса. Для значения $R_0 = 0,523$ радиуса Земли, принимаемого Койпером, расхождение возрастает. Кривая $\rho(r)$ Буллена дает лучшее, однако, неполное согласие. Это расхождение будет устранено, если $\rho(r)$ увеличить на 8%, перестроив верхние слои Земли до 700 км глубины.

Расчеты показали, что Венера несколько плотнее, чем это получается на основе кривых $\rho(r)$ Буллена и Рамзея. Изменение радиуса в допустимых пределах не устраняет расхождения. Предположение о значительной толщине атмосферы Венеры может только увеличить расхождение. Расхождение устраняется, если плотность в оболочке Земли увеличить на 5%.

Если верно определение Рабэ (?) массы Меркурия, то плотность Меркурия слишком высока для того, чтобы он мог иметь тот же состав, как и Земля. Высокая плотность Меркурия, образовавшегося из самой близкой к Солнцу части протопланетного облака, очевидно, объясняется повышенным нагревом формировавших его частиц, в результате которого в их составе могли остаться лишь наиболее тугоплавкие вещества, являющиеся, как правило, наиболее тяжелыми.

В табл. 1 приведены результаты расчетов, показывающих на какую долю первоначального значения должна быть увеличена плотность ρ вещества, слагающего Землю, взятая по данным Рамзея и Буллена для того, чтобы построить модель Луны, Марса, Венеры и Меркурия, а также давление и плотность в центре этих планет.

Таблица 1

	Луна	Марс	Венера	Меркурий
Данные $\rho(r)$ по Буллenu	1	1+0,08	1+0,05	1+0,33
Данные $\rho(r)$ по Рамзею	1+0,01	1+0,22	1+0,04	1+0,43
Давление в центре в атм.	51 000	250 000	2 200 000	220 000
Плотность в центре г/см ³	3,91	4,55	11,4	5,51

4. Тот факт, что, исходя из данных о распределении плотности в Земле, удается с удовлетворительной точностью построить модели Луны, Марса и Венеры, показывает: 1) что глубокие недра Земли почти не дифференцированы и 2) что все эти тела состоят приблизительно из одного и того же вещества. Малая дифференциация земных недр вполне естественна, если учесть расчеты Е. Н. Люстиха (11). В оболочке Земли железа находится почти столько же, сколько его было в первоначальном материале. Однако, если ядро и не является результатом завершённой гравитационной дифференциации всей Земли, то это не меняет того факта, что земная кора образовалась в результате не только физико-химической, но и гравитационной дифференциации нижележащих частей оболочки Земли.

Расчеты, основанные на кривой $p(\rho)$ Буллена, дают меньшие расхождения с фактическими данными, чем основанные на кривой Рамзея. Повидимому, кривая Буллена 1950 г. лучше отражает распределение плотности вдоль радиуса Земли. Дальнейший сравнительный анализ внутреннего строения земных планет, проводимый с помощью слегка измененных кривых $p(\rho)$ и с учетом небольшой дифференциации вещества Земли, и возможно, других планет, позволит уточнить распределение плотности в Земле. Судя по приведенным выше расчетам, плотность вещества в оболочке Земли (главным образом в ее верхних слоях) должна быть несколько увеличена по сравнению с данными Буллена 1950 г.

5. В недрах спутников существуют давления порядка нескольких десятков тысяч атмосфер, а для таких давлений мы почти полностью можем обойтись уравнениями состояния, полученными из опытных данных. Однако не для всех спутников известны массы и радиусы, а те, которые известны, очень неточны.

Средние плотности галилеевых спутников указывают на то, что они различаются по химическому составу. Ближайшие к Юпитеру спутники состоят из вещества, более плотного, чем вещество Земли и Луны, тогда как далекие содержат значительную долю легкого вещества (аналогичный состав имеет и Титан).

При расчете моделей спутников мы пользовались значениями их масс и радиусов, приведенными Койпером (7), а в качестве уравнения состояния вещества — кривой $p(\rho)$ для Земли (по Буллenu) и зависимостью $p(\rho)$ для углекислоты по Бриджмену (12). Кривая $p(\rho)$ Буллена не была исправлена для устранения эффекта образования земной коры и потому расчеты с этой кривой являются ориентировочными. Модели Ганимеда, Каллисто и Титана строились в виде ядра, состоящего из вещества Земли, окруженного оболочкой из углекислоты. В табл. 2 приведены массы, радиусы и средние плотности галилеевых спутников и Титана, средний состав рассчитанных моделей, а также давление и плотность в центре этих моделей.

Таблица 2

Спутник	Масса (Земля = 1)	Радиус (Земля = 1)	Средняя плотность г/см ³	Средний состав	Плотность в центре г/см ³	Давление в центре в атм.	
Ио	0,0121	0,255	4,03	Вещество Земли, } утяжеленное на: }	20%	4,70	56 000
Европа	0,0079	0,226	3,78		16%	4,52	42 000
Ганимед	0,0260	0,394	2,35	Вещества } Земли } Угле- кислоты: }	{ 53% 68% 46%	3,93	65 000
Каллисто	0,0162	0,350	2,06			3,90	44 000
Титан	0,0235	0,377	2,42			3,92	60 000

Существенные различия в химическом составе в единой системе спутников должны объясняться различиями в условиях образования и эволюции.

Поступило
28 VII 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ О. Ю. Шмидт, Четыре лекции о теории происхождения Земли, Изд. АН СССР, 1950. ² H. Jeffreys, M. N., 94, № 9 (1934); M. N. Geophys. Suppl., 4, № 1, 62 (1937). ³ Б. Ю. Левин, ДАН, 55, № 6 (1947). ⁴ В. Н. Лодочников, Зап. Всеросс. минер. об-ва, 2 сер., часть 68, вып. 2, 207; вып. 3, 428 (1939). ⁵ W. Ramsey, M. N., 108, № 5, 406 (1948). ⁶ K. Bullen, M. N., 109, № 6, 688 (1949); *ibid.*, 109, № 4, 457 (1949); K. Bullen, A. Low, M. N., 112, № 6, 637 (1952). ⁷ E. Rabe, Astron. J., 55, № 1184, 112 (1950). ⁸ G. Kuiper, The atmospheres of the Earth and Planets, 1952. ⁹ W. Ramsey, M. N., Geophys. Suppl., 5, № 9 (1949). ¹⁰ K. Bullen, *ibid.*, 6, № 1 (1950). ¹¹ Е. Н. Люстих, ДАН, 59, № 8 (1948). ¹² P. Bridgman, Proc. Amer. Acad. Arts and. Sci., 72, No. 5 (1938).