

П. Н. Чирвинский и В. К. Черкас

О распределении масс, давлений и плотностей в земном шаре и о его среднем химическом составе

(Представлено академиком А. Е. Ферсманом)

В последнее время вопрос о внутреннем строении земного шара и более общий вопрос о структуре космических тел (звезды-гиганты и звезды-карлики, новые звезды и туманности), равно как и о химических процессах, вызывающих изменение плотностей, а вместе с тем объемов и масс этих космических тел, — привлекает все более и более внимание геофизиков и астрофизиков. Как ни заманчивы выводы, получаемые по этому вопросу астрофизиками, равно как и теоретические соображения, какие дают нам геофизики и в частности сейсмологи, все же мы должны признать, что вопрос о внутреннем строении земного шара остается далеко еще не вырешенным.

Появившиеся в свет за последние годы работы Вашингтона, Ферсмана и Ниггли дают достаточно согласный средний химический состав земного шара, но в то же время вопрос о зональном его строении не получил и у них убедительного и бесспорного оформления (не согласны мы и с воззрениями на этот счет Тамманна и Гольдшмидта).¹

Этому последнему вопросу мы и посвятили настоящую работу, в результате которой получил свое разрешение и основной вопрос о среднем химическом составе Земли, как он нам представляется.²

¹ Литература всего вопроса приводится у Ниггли и Ферсмана. Работа Ниггли озаглавлена: *Geochemie und Konstitution der Atomkerne*. Fennia, 50, I. I. Sederholm gewidmet. № 6, Helsingfors, 1928. Он не успел использовать только работ Ферсмана, как не использовал работ Ниггли Ферсман, ибо работы последнего появились с работой Ниггли почти одновременно. Работы Ферсмана: *Строение и состав Земли как космического тела*. Научное слово, Л. 1928, 23—62; также: *К химическому составу Земли и метеоритов*. ДАН-А, 1928, № 12, 207—216.

² Нужно сказать, что состав земного шара в целом, как он был дан тремя названными авторами отличается от того, что давал уже давно первый из нас, а также германский исследователь Г. Линк. См. П. Н. Чирвинский. К вопросу о законах образо-

Так как для получения вывода о среднем химическом составе земного шара необходимо предварительно знать состав отдельных его зон и роль этих зон в общей структуре земного шара, то в своем изложении мы прежде всего и будем говорить об оболочках и ядре.

Ниггли при своих выводах принимает соотношение между оболочкой, „промежуточным слоем“ и ядром в объемном отношении 7:16:21. Для оболочки он принимает уд. в. 3—3,5, для промежуточного слоя мощностью 1200 км (эта глубина взята по тем соображениям, что здесь по сейсмометрическим данным проходит переломная зона скоростей уд. в. 4—5, от глубины 1200 км до 2900 км (на последней глубине наблюдается новый скачек в скоростях волн землетрясений, что отвечает повидимому переходу от оболочек к ядру, имеющему приблизительно 3500 км) уд. в. достигает 4,9—9,2 и наконец в ядре удельные веса лежат в пределах 9—11,5.

Средний состав Земли, по соотношению масс отдельных оболочек, установлен:

	1 По Вашинг- тону	2 По Ферс- ману	3 В среднем	4 То же при M = 1
1. Гранитная оболочка и др. второстепен- ные	0.48 ⁰ / ₁₀	0.5 ⁰ / ₁₀	0.49 ⁰ / ₁₀	0.0049 ⁰ / ₁₀
2. Базальтовая оболоч- ка	1.08	1	1.04	0.0104
3. Перидотитовая обо- лочка	40.08	36.5	38.29	0.3829
4. Рудная оболочка . .	31.06	30	30.53	0.3053
5. Ядро	27.30	32	29.65	0.2965
	100.00	100.0	100.00	1.0000

В дальнейших своих выводах мы будем базироваться на средних цифрах столбцов 3 и 4.

вания химических элементов во вселенной, И. Донск. полит. инст., 1919, 7, отд. 2, 94—164 (здесь специально трактует этот вопрос глава, озаглавленная: Псевдоэлемент террий); он же. Периодическая система химических элементов и закон компликации В. Гольдшмидта. И. Пгр. Н. Инст. им. П. Ф. Лесгафта, Пгр., 1920, 1, 46—51 (опечатки к этой статье в т. IV того же издания); он же. Еще по вопросу о законах образования химических элементов во вселенной. И. Донск. Полит. Инст., Новочеркасск, 1923, 8, 68—69 (резюме статьи), а сама статья полностью в тех же Известиях, 10 (за 1926—1927 гг.), Научный отдел, Новочеркасск, 1928, 116—139. Все поименованные работы Чирвинского были реферированы в двух распространенных заграничных журналах по немецки (Neues Jahrbuch der Mineralogie etc.) и по английски (Mineralogical Magazine). Тем не менее по крайней мере в вышецитированных работах Ферсмана и Ниггли об этих работах совсем не упоминается. В виду однако того, что не анализ литературы составляет задачу дальнейшей нашей работы, а разбор по существу вопроса о зонах и химическом составе земного шара, то вдаваться ближе в библиографию мы не будем.

Толщина означенных оболочек, по Ферсману, выражается в следующих цифрах (правда приходится и тут несколько вольничать в передаче его цифр, так как статья содержит много опечаток и в частности по недосмотру опущены даже его цифры среднего химического состава Земли, а приведены только цифры Вашингтона, к которым однако цифры Ферсмана должны быть близки):

	5	6
	Толщ. в км	Уд. веса
1. Самая наружная оболочка каменных пород (осадочных, гранитных)	20	2.43 ¹
2. Базальтовая оболочка	80	3.00
3. Перidotитовая оболочка	1100	3.80
4. Рудная оболочка (собственно рудная и палласитовая)	1700	5.50
5. Ядро (его радиус)	3460	10.00

Уже указывалось¹, что средний химический состав земного шара по всем трем авторам близок один к другому, а именно Вашингтон и Ниггли дают такие цифры:

	Средний химический состав земного шара в весовых процентах	
	7	8
	По Вашингтону	По Ниггли
Кислород	27.71	29.3
Кремний	14.53	14.9
Алюминий	1.79	3.01
Железо	39.76	36.9
Магний	8.69	6.73

¹ Эта цифра уд. веса, чтобы не сбивать себя при вычислении мелочами была нами определена из данных Ферсмана так:

	Глубина в км (толщина)	на	Уд. в. (плотность)
Кора выветривания	0.8	на	2.2
Осадочные породы	4.2	"	2.5
Метаморфические породы	5	"	2.7
Граниты	10	"	2.7
Всего	20 км		

Тогда $48.6 : 20 = 2.43$.

Вообще говоря, самая наружная зона литосферы, хорошо нам известная, играет в строении земного шара настолько ничтожную роль, что мы в дальнейшем будем называть ее для краткости гранитной, хотя она представлена комплексом пород гораздо более разнообразных; удельный же вес будем принимать не 2.7, как у гранитов и метаморфических пород, а 2.43. Об оболочке водной (гидросфера) и тем более газовой (атмосфера) при учете количественных отношений между главными зонами земного шара говорить совсем не приходится — настолько роль их ничтожна.

Средний химический состав земного шара в весовых процентах

	7	8
	По Вашингтону	По Нивгли
Кальций	2.52	2.99
Натрий	0.39	0.90
Калий	0.14	0.29
Водород	—	0.089
Титан	0.02	0.54
Фосфор	0.11	0.15
Углерод	0.04	0.060
Хлор	—	0.082
Марганец	0.07	0.14
Никкель	3.16	2.94
Кобальт	0.23	0.18
Сера	0.64	0.73
Барий	—	0.013
Хром	0.20	0.13
Цирконий	—	0.010
Медь	—	0.011

Для понимания геологического строения земного шара в целом (т. е. в деле распада его на оболочки и ядро), равно как и в понимании распределения давления по отдельным горизонтам до сих пор не обращалось внимания на изменение силы тяготения с глубиной, на чем мы и намерены остановиться ближе и проанализировать с этой точки зрения результаты работы о строении земного шара и давлениях в нем, полученные другими исследователями.

По принципу Ньютона и теореме Маклорена эллипсоидальный однородный слой внутренних точек не притягивает, а внешнюю точку притягивает по нормали к поверхности эллипсоида и пропорционально массе. Для удобства вычислений представим себе ранее приведенные оболочки однородными каждая в себе и в то же время сферическими вместо эллипсоидальных (ибо земной шар мало отличается от сфероида), примем также радиус земного шара за 1, объем за 1 и всю его массу за 1. В приводимой таблице (табл. 1) даются соотношения интересующих нас масс и объемов. Что же касается относительной роли мощностей отдельных оболочек и ядра, то они таковы: гранитная оболочка в широком смысле этого слова 20 км или в отношении к земному радиусу, принятому за единицу, 0.0031, базальтовая оболочка 0.0126, перидотитовая оболочка 0.1730, „рудная оболочка“ 0.2673 и наконец ядро 0.5440. Контролем правильности нашего расчета, данного в табл. 1, могут служить следующие вычисления, дающие нам в среднем удельный вес Земли (5, 6).

Таблица 1.

Оболочки ¹	9 Верхние границы оболочек	10 Массы отдельных оболочек	11 Объемы оболочек	$\frac{\text{Масса}}{\text{объем}} = \text{Уд.в.}$	12 Уд. веса оболочек ²
1. „Гранитная оболочка“	1.00000	0.0049	0.00940	0.5224	2.93
2. Базальтовая оболочка	0.99689	0.0104	0.03712	0.2803	1.57
3. Перидотитовая оболочка	0.98428	0.3829	0.41954	0.9127	5.11
4. „Рудная оболочка“	0.81132	0.3053	0.37304	0.8185	4.58
5. Ядро	0.54402	0.2965	0.16100	1.8412	10.31
		<u>1.0000</u>	<u>1.00000</u>		

Помножаем объем отдельных оболочек Земли на выведенные цифры удельных весов.

1. Гранитная оболочка	0.00940 × 2.93 = 0.027542
2. Базальтовая "	0.03712 × 1.57 = 0.058278
3. Перидотитовая "	0.41454 × 5.11 = 0.143849
4. Рудная "	0.37304 × 4.58 = 1.708523
5. Ядро	0.16100 × 10.30 = 1.659910
Суммы	1.0000 × 5.6 = 5.598102

Таким образом, выведенные нами из данных Ферсмана средние удельные веса не отвечают тем, которые дает Ферсман для соответственных оболочек. Исключение представляют только цифры для гранитной оболочка (количественно не играющей существенной роли в сложении Земли) и ядра. Особенно сильные расхождения получены для базальтовой и перидотитовой оболочек. Отсюда дилемма: или оболочки по своей мощности как Вашингтоном, так и Ферсманом, были неправильно скомбинированы или были при правильной мощности взяты неправильно удельные веса (некоторую, но не решающую роль могли также сыграть опечатки в работе Ферсмана, на которую мы опирались).

¹ Точнее области, так как в это понятие входит как оболочка, так и ядро.

² $0.5224 \times 5.6 = 2.93$

$0.2803 \times 5.6 = 1.57$

$0.9127 \times 5.6 = 5.11$

$0.8185 \times 5.6 = 4.58$

$1.8412 \times 5.6 = 10.31$

Если далее мы учтем, соответственно принятым массам и радиусам оболочек, силу притяжения на границах оболочек, то принимая силу притяжения точки Землей на ее поверхности за 1, получим такие цифровые данные:

Граничные поверхности	Сила притяжения (F)	Сила притяжения внутри соответственных оболочек ¹
1. Поверхность Земли	1.0000	1.00065
2. Начало базальтовой зоны	1.0013	
3. Верхняя граница перидотитового горизонта	1.0164	1.00885
4. Верхняя граница рудной зоны	0.9143	0.96535
5. Периферия ядра	1.0018	0.95805
6. Центральная часть ядра	0.0000	0.50090

Примечание. При исчислении напряжения силы тяжести внутри земного шара, имея в виду вращение Земли, следует учесть также действие центробежной силы, величина которой на различных глубинах будет различна, в зависимости от плотности оболочек, расстояния их от центра Земли и угловой скорости вращения.² Так как ныне мы можем считать земной шар почти сконструированным из частицы его неподвижными или во всяком случае малоподвижными, вследствие чего угловые скорости вращения их равными, то поэтому напряжение тяжести внутри Земли будет обуславливаться только плотностью и расстоянием от центра. Теоретически полное напряжение внутри земного шара исчисляется по формуле:

$$g = \frac{3g_0}{\delta_m r_0} \cdot \frac{1}{r^2} \int_0^r \delta r^2 dr \dots \dots \dots (1)$$

где g_0 — напряжение тяжести на поверхности Земли

r_0 — радиус Земли

r — расстояние от центра Земли

¹ Мы для простоты принимаем эту силу за половину сил притяжений на верхней и нижних границах соответственных областей — ошибка здесь есть, но она так невелика, что для нашей цели можно с ней не считаться.

² Уменьшение напряжения тяжести на экваторе, обуславливаемое сжатием Земли и центробежной силой, выражаемой $f = \rho\omega^2 r$, где ρ масса вращающейся частицы, ω угловая скорость и r радиус вращения, составляет 0.0051 силы тяжести у полюсов. Если же не принимать во внимание сжатия и, для упрощения вычислений, считать Землю шаром, как мы в данном случае и поступаем, то уменьшение сил тяжести на экваторе, обуславливаемое лишь вращением Земли вокруг оси, будет 0.0016, что для средних широт составит около 0.0008. Если взять эту последнюю цифру как среднюю, и перевычислить удельные веса пород, составляющих различные оболочки от периферии к центру Земли, то относительные удельные веса этих оболочек должны быть соответственно уменьшены, а именно для осадочной и гранитной оболочки на 0.002 и для оболочки ядра на 0.004, что по существу не изменяет характера распределения оболочек (зон) и присущих им удельных весов.

δ_m — средняя плотность Земли
 δ — плотность соответствующей зоны.

Принимая для распределения плотностей, в предположении равномерного их возрастания к центру, формулу Лежандра (Legendre)

$$\delta = \delta_c \frac{\text{Sin } nr}{nr} \dots \dots \dots (2)$$

или формулу Роша (Roche)

$$\delta = \delta_c (1 - \beta r^2) \dots \dots \dots (3)$$

мы видим, что определение плотности по той или другой формуле (2 или 3) зависит от некоторых постоянных величин n , r , β (приводимых в числовых выражениях в соответственных курсах) и от плотности в центре Земли δ_c , которая, при допущении вообще возрастания плотностей от периферии к центру, различными авторами устанавливается в пределах от 10.1 (Рош) до 12.9 (Листинг). Гельмерт, основываясь на формуле Роша, приходит к заключению, что максимум тяжести лежит приблизительно на глубине 0.157 земного радиуса, т. е. на глубине 1000 км от поверхности Земли и составляет около 105% величины тяжести на поверхности Земли. Если же, как допускает проф. Клоссовский, в основу закона плотностей положить формулу,

$$d = d_0 - ar$$

где d_0 — плотность в центре Земли, r — расстояние точки от центра, a — некоторый численный коэффициент, то тогда максимум напряжения силы тяжести должен находиться на глубине 0.186 радиуса от поверхности Земли (конкретнее на 1068 км глубины), что близко подходит к цифре Гельмерта (1000 км). Гутенберг теоретически допускает, что при некоторых особенностях в распределении плотностей напряжение силы тяжести внутри Земли может достигать максимума, затем может уменьшаться и далее опять приближаться к максимуму.

В наших вычислениях, плотности оболочек приняты не по закону непрерывного возрастания, и кроме того плотность ядра взята примерно в половину устанавливаемой для нее другими авторами, вследствие чего напряжение тяжести внутри Земли получило иное значение для различных оболочек, не вполне отвечающее выводам, полученным названными выше авторами (по формуле 1). Вычисление наше правильное, ибо учитывались как расстояние оболочек от центра, так и действительная (предполагаемая, конечно) плотность каждой оболочки. Ново здесь однако то, что у нас вводится понятие об „относительном удельном весе“ (или „относительной плотности“), зависящем от напряжения тяжести на различных глубинах. У нас получился при этих условиях первый главный максимум на верхней границе перидотитовой оболочки (на глубине около 100 км) и два слабо выраженных максимума на верхней границе базальтовой оболочки (глубина 20 км) и на периферии ядра (глубина 2900 км), что однако подтверждает приведенные выше соображения Гутенберга о теоретической возможности подобных максимумов.¹

¹ Подробнее см. Н. Thiene. Temperatur und Zustand des Erdinnern, 1907, 33—35.— В. Gutenberg. Lehrbuch der Geophysik, 1926, Lief. 3, 439—451.— Н. Wehner. Das Innere der Erde und der Planeten, 1908, 43—44.— А. Клоссовский. Основы метеорологии, 1910, 8—10.

Условимся называть (хотя это и представляет собою несомненно научную вольность), для краткости, удельные веса тел на поверхности Земли абсолютными удельными весами (абс. плотностями), а те же удельные веса при учете изменчивости напряжения силы тяжести на глубине — относительными. При этом условии выведенные нами выше абсолютные удельные веса областей земного шара мы должны перевычислить. Вводим множителем силу тяготения, разную по величине для разных оболочек, мы получим следующие удельные веса:

14

1. Гранитная оболочка	2.932 (2.93 × 1.00065)
2. Базальтовая „	1.584 (1.57 × 1.00885)
3. Перидотитовая „	4.933 (5.11 × 0.96535)
4. Рудная „	4.388 (4.58 × 0.95805)
5. Ядро	5.164 (10.31 × 0.50090)

Эти относительные удельные веса важны для нас как в смысле распределения масс, так и давления внутри земного шара (в его центре).

Таким образом, с точки зрения относительности удельного веса, породы, залегающие в центральном ядре земного шара, если бы это было и тяжелое никкеластое железо, будут почти однозначны с породами перидотитовой оболочки: колебания относительных удельных весов здесь очень невелики: 4.933—4.388—5.164.

Этот вывод безынтересно сопоставить с заключением проф. Гольшмидта относительно того, что палласиты могут происходить только от разрушения небольших небесных тел, которые обладали лишь небольшой силой тяготения.

Дело в том, что при плавлении палласитов, метеоритов, состоящих из сравнительно легкого оливина и тяжелого никкелистого железа, в поле тяготения, отвечающего земной поверхности, происходит расслаивание расплава, причем тяжелое железо располагается внизу, а легкий оливин расплав всплывает кверху. К этим же выводам приводят многочисленные наблюдения металлургов, имеющих дело с системами металлшлак. Если поле тяготения будет слабым, то при известной вязкости расплавов, постепенно кристаллизующихся, его влияние не будет в состоянии проявиться настолько, чтобы произошло расслаивание, возможное при полях тяготения большего значения. Вот при этих-то условиях каплевидные образования оливина (удельный вес, абсолютный для оливина из палласитов, в среднем 3.38) могут остаться вмещенными и в металлическом железе (удельный абсолютный вес никкелистого железа палласитов 7.70). Мы видим однако, что это может иметь место не только в небольших по размерам небесных телах, но и в телах крупных, если мы будем наблюдать эти системы на значительной глубине. Распреде-

ние пород по величине их абсолютных удельных весов не должно идти параллельно с таковым же распределением их по относительным удельным весам, ибо первые определяются при условии постоянного поля тяготения (на поверхности Земли), относительные же удельные веса приурочиваются нами к различным глубинным зонам той же Земли, где сила тяготения изменяется в зависимости от масс и радиусов внутренних сфероидов.

Плотность оболочек весьма важна для исчисления размеров давлений, существующих в недрах земного шара и в частности в центре Земли.

Если взять цифры Ферсмана, а именно:

		Уд. в.	Мощность в км	Давление на 1 кв. см
1. Гранитная	оболочка . . .	2.45	20	4.9×10^6 г
2. Базальтовая	" . . .	3	80	24×10^6 "
3. Перidotитовая	" . . .	3.8	1100	418×10^6 "
4. Рудная	" . . .	5.5	1700	985×10^6 "
5. Ядро		10	3460	3460×10^6 "

Отсюда давление в центре должно быть 4841.9×10^6 г на 1 кв. см

Так как давление в 1 атмосфере на 1 квадратный сантиметр равняется 1033 г, то в переводе на атмосферы то же давление выразится цифрой 4677 541 (а присчитав еще 1 атмосферу воздушного давления 4 677 542), т. е. свыше 4.6 миллионов атмосфер. Эта цифра превосходит обычно принимаемую цифру давления в центральном ядре Земли 3 миллиона атмосфер (эта цифра принимается и Ферсманом, по формуле Роша она получается равной 2.9 миллиона атмосфер, Вильямсон и Адамс определяют то же давление в 3.1 мегабар, т. е., считая 1 мегабар равным 987 000 атмосфер имеем 3 059 700 атмосфер). Цифра около 3 миллионов атмосфер, действительно, может быть получена, но при условии, если взять не абсолютные плотности Ферсмана, а вычисленные нами относительные плотности для данных оболочек (заметим, что введение понятия относительных удельных весов или плотностей приводит к понятию относительной массы), а именно

Области	Отн. уд. в.	Толщина в км	Давление на 1 кв. см
1. Гранитная	2.95	20	5.9×10^6 г
2. Базальтовая	1.61	80	12.88×10^6 "
3. Перidotитовая	4.93	1100	542.3×10^6 "
4. Рудная	4.39	1700	746.3×10^6 "
5. Ядро	5.16	3460	1785.36×10^6 "
Итого			3092.74×10^6 г

Давление в атмосферах будет получено от деления этой цифры на 1033. Это будет 2993940, что за округлением и дает 3 миллиона атмосфер.

Нужно однако заметить, что и такой способ исчисления давления в центре земного шара является неправильным по следующим соображениям.

Давление на точку, расположенную в центре Земли, будут производить частицы не только линейно или радиально расположенные над этой центральной частицей, а вся совокупность частиц, заключающихся в коническом секторе. Кроме того надо принять во внимание, что если давление на поверхность Земли и в недрах ее направлено к центру, то давление на частицу, находящуюся в центре, будет производиться со всех сторон. Поэтому, хотя все давления в центре Земли будут компенсироваться, но тем не менее центральная частица будет испытывать большое напряжение (будет всесторонне сжата), и то давление, которое мы на поверхности Земли определяем на каждую точку в виде давления одной атмосферы, будет в отношении центра Земли совокупным давлением на этот центр всей атмосферной оболочки. Определяя силу давления атмосферы как давление 1033 г на 1 кв. см земной поверхности, и учитывая всю поверхность земного шара в квадратных километрах, мы найдем, что вся земная поверхность площадью 508 304 664.222 кв. км испытывает

$$508\,304\,664.222 \times 1000 \times 1000 \times 100 \times 100 \times 1033 \text{ г} \\ = (\text{за округлением}) 525 \times 10^{19} \text{ г}$$

Это и будет атмосферное давление, отнесенное к центру Земли, т. е. это будет давление 1 атмосферы на центр Земли.

Если далее вычислить давление масс на центр Земли, исходя из конического сектора и из средней плотности Земли 5.6, то окажется, что каждый такой конус (или пирамида) с площадью наружной поверхности в 1 кв. км и с вершиной в центре Земли, будет давить на точку в центре с силой, равной 118.72×10^{17} г.

Так как таких конусов, с поверхностью в 1 кв. км, будет в земном шаре

$$508\,304\,664 = 5083 \times 10^5,$$

то следовательно давление в центре Земли выразится в следующих цифрах:

$$118.72 \times 10^{17} \times 5083 \times 10^5 = 60346 \times 10^{23} \text{ г},$$

что составит давление, равное (в круглых цифрах) 1.15 миллиона атмосфер. Это уже не 3 миллиона, обычно принимаемые.

В указанном порядке должны быть перевычислены давления и в остальных оболочках, каковы бы давления, конечно, получаются соответственно меньше.

Если далее допустить, как это обыкновенно принято, что температура является некоторой функцией давления, то естественно получается вывод, что и температура зон должна быть гораздо ниже, чем это принято думать (Ферсман-то еще ее оценивает в отличие от других авторов умеренно, именно для рудной зоны в 1000° , для центрального ядра 2000° и лишь с сомнением — цифра в скобках и с вопросительным знаком — 8000°). Можно идти и дальше в доказательствах, что давления на глубине не достигают и тех величин, которые мы вычислили только что: если только всесторонне и равномерно сжатые тела не будут проявлять даже при очень больших давлениях текучести и пластичности, как это обычно принимается, а будут вести себя как почти абсолютно твердые тела, то в земном шаре будут образовываться системы сводов, которые даже могут совсем изолировать центральные части от внешнего для них давления. Если же центральная часть ядра будет обладать пустотой, как это нам кажется достаточно вероятным, то здесь давления, в идеальном случае может даже не быть совсем. Во всяком случае совершенно не научно приписывать породам и минералам, известным нам на земле, в глубине, под влиянием сжатия, абсолютные удельные веса, резко превосходящие те, к которым мы привыкли: опыты физиков не дают нам для такого предположения никакого веского основания, скорее же как раз наоборот. Сжимаемость твердых тел по сравнению с жидкостями и тем более газами ничтожна и она тем меньше, чем выше давление. В идеальном случае вполне мыслимо прекращение всякой подвижности или сжимаемости при громадных давлениях, исчисляемых впрочем лишь сотнями тысяч атмосфер как у тел твердых, так жидких и газообразных (собственно говоря, здесь уже не будет в этом отношении между ними разницы). Вот почему, если ядро Земли будет окружено оболочкой в виде свода, а само будет в состоянии жидком или газообразном (не говоря уже о том, что оно может быть и пустым), то давление в самом ядре будет обуславливаться только собственной массой. Если принять массу ядра за 0,3 массы Земли, то давление в ядре должно быть не более 345 000 атмосфер или в 9 раз менее, чем принимает Ферсман.¹

Так как внутри железного ядра сила тяготения в направлении к его центру уменьшится (уменьшается и удельный вес никкелистого железа, но это, конечно, ни в коей мере не значит, что изменяется резко его абсолютный удельный вес и др. свойства этого металла: иначе бы мы это

¹ Ср. наши рассуждения с таковыми же других авторов: В. Gutenberg. Lehrbuch der Geophysik, Berlin, 1926, Lief. 3, 450—452, а. а. О. § 267, 449.

смогли установить и при исследовании железных метеоритов, которые некогда были положены внутри того или другого небесного тела может быть на большой глубине, там окончательно отвердели, сформировались и затем при какой-то катастрофе были рассеяны в качестве обломков в мировом пространстве, — давление глубинное, под которым они находились, сразу сменилось бы на давление, равное нулю), то является действительно искушение допустить, что в центре возможна настоящая пустота. Этот вывод таким образом стоит в противоречии с тем, что с глубиной предполагают непрерывный рост удельных весов пород и даже рост удельных весов одного и того же вещества от одной сжимаемости (так например, принимают, что удельный вес железа в ядре может быть на 7.7, а 9—11).¹ Общая картина возрастания абсолютно удельных весов верна, но нельзя ее доводить до каррикатурности и физической невозможности. В самом деле, ведь и по данным сейсмических наблюдений над скоростями поперечных волн некоторые авторы делают заключение, что они резко уменьшаются и даже может быть совсем прекращают свое существование на той большой глубине, где мы имеем основание предполагать существование какого-то ядра (см. например, в работах Олдгема, Кнотта, Виссера и др.): начинается может быть здесь жидкое или газообразное состояние, не доведенное сжатием до твердого. Предположение Венера, что все вообще планеты представляют собою пустотелые тела, нам кажется очень вероятным. Ускоренно вращающиеся жидкие массы должны стремиться к тому, чтобы стать пустотелыми, наконец, и при отвердевании должны быть усадочные раковины, в том числе и центрально положенная. Чем скорее будет вращаться жидкая масса в виде сфероида, тем больше она сплющится и тем больше должна быть в ней центральная полость. В исключительных случаях, в этой центральной пустоте как в пространстве, уравновешенном внешними силами, может остаться клуб (клуб) материи, так сказать внутреннее обособленное ядро, малой плотности, о существовании которого нам и невдомек. Устойчивость пустотелых небесных тел нам являют кольцевые туманности,² планетарные кольца (Сатурн), кратные звездные системы, причем объекты последних вращаются вокруг общего центра тяготения системы, не заполненного никакой массой. Наконец из земных объектов можно указать на мыльные пузыри, поверхностное натяжение оболочек коих уравновешивается внутренним давлением газа. Но если предположить, что такая оболочка

¹ Н. Thiene. Temperatur und Zustand des Erdinnern. Jena, 1907, 33—35. — В. Gutenberg, a. a. O., Lief. 3, 444—448 (Kapitel: Berechnung der Dichte im Erdinnern, 444—448).

² Из 78 газообразных туманностей 55, т. е. значительное большинство, показывает наличие центральной звезды. Это характеризует планетные туманности, которые может быть представляют сильно сплюснутые сфероиды (особ. N. G. 7009).

пузыря могла бы, при сжатии и затвердевании в безвоздушном пространстве постепенно пропускать через себя внутренний газ и окончательно затем затвердеть, то мы могли бы представить себе сфероид, с затвердевшей оболочкой, лишенной внутренней массы, или во всяком случае там могла бы остаться лишь масса чрезвычайно малой плотности, близкой к пустоте. Не следует забывать, что водород, вообще крайне распространенный газ во вселенной, с одной стороны, поглощается в некотором количестве расплавленным железом (следовательно и железным ядром Земли), а с другой, способен уже при красном калении диффундировать через массу железа.

Нужно подчеркнуть, что при распределении в Земле масс играла не только сила тяжести, но также центробежная сила. Значение последнего фактора в начальные стадии формирования Земли как небесного тела, было особенно значительно, так как есть основания полагать, что вращение Земли тогда в целом происходило скорее (возможно, что оборот этот совершался только в течение 5 часов). Допустимо, что сила центробежная даже ранее превосходила таковую же тяготения. Вот почему в те ранние стадии самое распределение масс могло быть иным: тяжелые массы могли мигрировать не к центральным, а к периферическим частям сфероида, вращавшегося быстро вокруг своей оси. Когда однако скорость вращения вокруг оси стала уменьшаться, шло постепенное приспособление масс к новым условиям равновесия — здесь роль тяготения стала обрисовываться все больше и больше. Объем всей системы стал уменьшаться. Газы внутренних частей земного шара могли быть закупоренными наружными отвердевающими массами, в то время как прежде они легко сравнительно выбрасывались в виде протуберанцев.

В нашей схеме строения земного шара большая зона нарушения в скоростях волн землетрясений (глубина ее принимается в 1200—1300 км) совпадает с границей хондрито-литосидеритовой зоны и верхней поверхностью железного ядра. Здесь наблюдается и довольно большой разрыв в величинах удельных весов пород (возможно, что даже в этой области проходит зона раздробления и переплавления, причем выше лежащие части земного шара имеют несколько иное время оборота, нежели самое ядро; о возможности таких явлений в теле Земли писал П. Н. Чирвинский: *Еж. по геол. и минер. России*, 15, вып. 2—3). Что касается отображения следующего крупного нарушения в скоростях волн землетрясений, приходящегося на глубину 2900 км, то физически это явление по нашей схеме необъяснимо: эти глубины у нас падают в пределы железной оболочки, состав которой должен отличаться особенно большим постоянством.

При переходе вследствие охлаждения из жидкого состояния в твердое, особенно сильные напряжения должны проявляться в пограничной

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗЕМНЫХ ОБОЛОЧЕК ПО ИХ ОБЪЕМАМ, МАССАМ И УДЕЛЬНЫМ ВЕСАМ ПРИ ДОПУЩЕНИИ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПУСТОТЫ (ПО П. Н. ЧИРВИНСКОМУ И В. К. ЧЕРКАСУ)

16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Названия областей (оболочек)	Толщина оболочек в долях зем- ного радиуса ($R=1$)	Толщина оболочек в км	Верхняя граница оболочек в долях зем- ного радиуса ¹ ($R=1$)	Объемные отношения оболочек (объем Земли принят за 1)	Абс. уд. веса пород обо- лочек (ср. велич.)	Массы оболочек при уд. в Земли= 5 6	То же при массе Земли=1	Напря- жения силы тяжести ²	Относи- тельные уд. веса оболочек	Относи- тельные массы оболочек
1. Гранитная обо- лочка	0.003	20	1	0.0094	2.4	0.0226	0.004	1	2.405	0.0221
2. Базальтовая обо- лочка	0.013	80	0.99686	0.0371	3.0	0.1113	0.020	1.002	3.024	0.1122
3. Хондритовая .	0.180	1145	0.98428	0.4333	3.6	1.5608	0.279	1.008	3.917	1.6976
4. Литосидерито- вая (палласито- вая) оболочка	0.006	40.5	0.80425	0.0122	4.6	0.0561	0.010	1.088	4.963	0.0605
5. Железная обо- лочка	0.598	3802.5	0.79790	0.5000 ³	7.7	3.8500	0.687	1.079	4.951	2.8491
6. Пустота . .	0.200	1272	0.20000	0.0080	0	0	0	0	0	0
	1.000	6360		1.0000		5.6000	1.000			4.7418

¹ Считая от центра Земли² На верхних уровнях оболочек (сила тяготения на поверхности Земли).³ См. прим. на стр. 117.

Примечание к таблице 2. (К графе 20). Объем 0.5000 получен как сумма для верхней половины рудной оболочки и нижней ее половины, а именно: $0.3338 + 0.1162 = 0.5000$; (к графе 22) подобным же образом $3.8500 = 2.9553 + 0.8947$; (к графе 23) $0.687 = 0.527 + 0.160$; (к графе 24) в середине железной оболочки сила притяжения $F' = 0.643$, тогда $7.7 \times 0.643 = 4.951$; (графа 25) в графе 25 верхняя зона железной оболочки имеет „относительный удельный вес“ 8.398, средняя зона, как было показано, 4.951, верхний промежуточный слой 6.674, нижний промежуточный слой 2.475. Что же касается нижней границы оболочки, то здесь он равен нулю. Иначе говоря, здесь величины относительных удельных весов уменьшаются сверху вниз, а именно с 8.398 до 0. Изменение идет вполне постепенно. В табл. 2 мы совсем не учитывали значения перидотитовой зоны, так как эта оболочка, как образовавшаяся путем отставания в зоне габбро-базальтовых магм, по нашему мнению количественно должна быть слабо представленной. К тому же и базальтовая зона сама по себе очень тонка. Заметим, что по самым новым наблюдениям, сделанным проф. Р. Браунсом на одной из фабрик, плавящих для литья базальт, удалось видеть, что действительно оливин способен как более тяжелый минерал оседать на дно заводской печи. В этом придонном слое было 75% оливина, удельный вес придонного слоя 3.08—3.14. Слой этот по отношению к объему всей плавленной базальтовой массы был очень тонок. Вообще сказать, что такие метеориты, как отвечающие перидотитам, пироксенитам и базальтам (небесные базальты-эвкриты) блуждают в мировом пространстве неизмеримо реже, нежели каменные метеориты типа хондритов. Это видно из таких цифровых данных, вычисленных П. Н. Чирвинским: в совокупности этих редких метеоритов всего 3.77% всех каменных метеоритов, из коих львиная доля приходится на хондриты. Хондриты же преобладают над литосидеритами и метеоритами железными.

области между железным ядром и силикатной оболочкой, ибо уменьшение объема силикатной оболочки ко времени, когда железное ядро еще остается жидким, должно составить приблизительно 13—14%. Если же оно отвердеет, то все равно его усадка должна быть только около 1—1.6% (этого порядка усадка наблюдается в отливках из чугуна), что подтверждается и нашим расчетом: у нас объем центральной пустоты, хотя диаметр ее достигает внушительной величины 2544 км, по отношению к объему всего земного шара измеряется только 0.8%, а по отношению к составляющему половину объема Земли железному ядру равняется 1.6%. Цифра эта очень невелика по сравнению с цифрой усадки силикатной оболочки. В области силикатной оболочки и прежде всего в хондритовой зоне должны наблюдаться преимущественно радиально идущие трещины, в которые будут внедряться интрузивные массы никкелистого железа и литосидерита, возможны извержения и газов, которые будут вырываться наружу и даже выбрасывать в мировое пространство в распыленном состоянии особенно те породы, которые со временем обращаются в то, что мы называем хондритами. Таким образом, поскольку имеется в виду для хондритов особый тип структур (обломочный, туфовый), то конечно хондритовые магмы, при затвердевании на глубине и без выброса наружу, этой структуры должны быть лишены. Так как взрывы и извержения этого рода в небесном теле должны иметь очаги в области пограничной

между силикатными оболочками и железным ядром,¹ то становится понятным, что именно при этих условиях каменных метеоритов должно быть значительно больше, нежели литосидеритов и железных метеоритов, что и наблюдается в действительности.

Генезису метеоритов вообще мы намерены посвятить особую работу, для которой накоплен уже значительный материал. Если мы этого еще не сделали, то лишь потому, что вопрос о скоростях болидов, с которыми некоторые почти отождествляют метеориты (болид есть-де неупавший или вернее нерозысканный метеорит), требует осторожного и вдумчивого к себе отношения. Можно только думать, что при определениях скоростей болидов и падающих звезд делается какая-то систематическая ошибка, которая ведет к тому, что даже в отношении заведомых членов периодических потоков, т. е. вращающихся по замкнутым орбитам, могут получаться не только параболические, но и гиперболические орбиты. Что касается метеоритов, то о их скоростях (кроме трех случаев, приводимых и в каталоге Ниссля-Гофмейстера), мы ничего достоверного не знаем, а эти три случая не могут нам служить путеводной звездой в этом вопросе, и сами по себе даже эти определения должны быть в области тех же сомнений, какие допустимы по отношению к скоростям болидов. При развитии звездного мира и в частности в формировании новых звезд из звезд гигантов, возможно, мы имеем нечто аналогичное более скромному по своим масштабам взрыву в пограничных областях между силикатной оболочкой и никкелисто-железным ядром, но только здесь возможно, что весь этот процесс носит исключительно внутриатомный характер. Судя по быстротечности явлений новых звезд, а также потому, что, несмотря на мощность вспышки, все же на месте катастрофы остается более или менее приметная звезда, нужно полагать, что источник энергии, производящий вспышку новой звезды, заложен не в центральных частях звезды, а в каком-то слое на некоторой глубине под поверхностью (см. П. Я. Давидович. Природа Новых звезд. Журн. Природа, 1929, № 11, 932).

Средний химический состав земного шара

Если взять цифры графы 23 (табл. 2) и состав, обычно принимаемый для входящих в состав Земли зон (в частности типа метеоритов; подробнее

¹ Возможно, что эта локализация рвущихся наружу газов, прежде растворенных в железном ядре, происходит по той причине, что железное ядро постепенно отвердевает, растворимость в нем газов и прежде всего водорода падает, а способность к диффузии через самую железную массу, как еще имеющую достаточно высокую температуру, остается. Эта диффузия, идущая как в сторону внутренней пустоты, так и наружу в сторону силикатных оболочек, встречает в последних значительное препятствие. Само по себе давление недостаточно, чтобы нарушить их цельность, но при помощи объемных отношений между отвердевшей (сжавшейся) силикатной оболочкой и железным ядром эти взрывы становятся вполне возможными.

у Ферсмана, у Чирвинского в разных статьях и др.), то состав земного шара в целом выразится цифрами столбца I. В столбце II даются аналогичные цифры, полученные П. Н. Чирвинским еще в 1919 г., т. е. ранее Кларка, Вашингтона, Ферсмана и Ниггли; в III приводятся цифры американца Кларка (1924 г.), которые близки к нашим, но отличаются от цифр Вашингтона, Ферсмана и Ниггли.

	I	II	III
Кислород	11.36	11.28	12.77
Кремнезем	5.79	5.82	6.96
Алюминий	0.59	0.44	1.86
Железо	69.33	69.79	67.20
Никкель	6.39	6.25	6.04
Кобальт	0.48	0.42	0.41
Магний	4.00	4.28	2.13
Кальций	0.60	0.52	1.12
Натрий	0.24	0.19	0.58
Калий	0.09	0.05	0.39
Марганец	0.04	0.05	0.08
Хром	0.12	0.10	0.07
Медь	0.04	0.01	—
Сера	0.66	0.66	0.96
			(включая также углерод и медь)
Фосфор	0.17	0.13	0.16
Углерод	0.10	0.04	—
	100.00	100.03	100.75

По цифрам столбца II П. Н. Чирвинским был вычислен атомный вес псевдоэлемента террия, оказавшийся равным 40, т. е. атомному весу кальция.

Новочеркасск
Март 1930 г.