

УДК 551.24.03

Н. П. ВАСИЛЬКОВСКИЙ, Г. Н. КАТТЕРФЕЛЬД, М. С. ЛАПО

## ГРАВИТАЦИОННОЕ СЖАТИЕ ЗЕМЛИ И ТЕКТОГЕНЕЗ

Предполагается, что сжатие Земли вызывается по крайней мере тремя различными факторами, и суммарный их эффект может служить одной из главных причин образования глобального структурного плана Земли и складчатого строения коры. Новый вывод средней скорости ( $2,6 \text{ см/столетие}$ ) сокращения радиуса Земли был основан на неравномерном режиме гравитационного сжатия и вытекает из расчета сжатия планеты за все время ее геологической истории.

Тектонические деформации Земли и распределение тектонической активности во времени и пространстве наиболее правдоподобно могут быть оценены путем анализа основных этапов возникновения, становления и развития нашей планеты как космического тела в пределах полей гравитации Земли, Луны и Солнца. Взаимодействуя с энергетическими процессами в веществе этих полей, эти поля определяли формирование и развитие Земли, динамику ее вращения, непрерывно-дискретное сжатие и последовательную дифференциацию самого земного вещества.

Подобной методологией исследования пользовались многие исследователи [19, 31, 2, 3, 12, 13, 6 и др.]. По мнению авторов, Земля в ходе своей истории должна была находиться в состоянии гравитационного сжатия<sup>1</sup>. Сложный путь дифференциации вещества Земли и всей истории ее тектонического развития протекал под воздействием развивающегося поля гравитации; в результате взаимодействия астрономических процессов глобального масштаба с веществом планеты, возникали и развивались геологические процессы, связь между которыми последовательно возрастала от локальных к региональным и глобальным взаимосвязям.

Существование в земной коре дополнительных к вызываемым напругой вышележащих пород горизонтальных напряжений [5, 28], находится в соответствии с выводами астрономов о совершающемся сокращении радиуса Земли [30, 26 и др.].

Скептическому отношению к контракционной гипотезе способствовало стремление видеть единственную причину контракции в потере тепла, унаследованного Землею от космогонического этапа ее развития. Сейчас никто не сомневается в том, что Земля в течение всей своей жизни сама генерировала достаточное количество тепла, даже для ее разогревания. Если допустить, что разогревание прекращалось, то и тогда максимальный эффект охлаждения (например, расплавленной Земли)

---

<sup>1</sup> Эпохи расширения в истории Земли авторами не отрицаются, но по сравнению с вековым сжатием они имели второстепенное значение и, скорее всего, являлись его физическим следствием [13].

мог бы повлечь уменьшение окружности планеты не более, чем на 50 км [11]. С другой стороны, получены убедительные доказательства возможности образования некоторых типов складок без внешнего бокового давления. И тем не менее, механизм формирования крупных орогенных поясов трудно понять без тангенциальных напряжений, хотя столь же трудно определить их природу. Подъем магмы, гравитационные перемещения горных масс, изостазия, даже ротационные и другие астрономические факторы не могут обеспечить всей совокупности процессов тектогенеза [14]. Грандиозный же дрейф блоков литосферы, несмотря на возросшую популярность «теории плит», пока остается лишь смелой гипотезой. Между тем, о совершающемся сокращении объема Земли убедительно свидетельствуют планетарно-геологические, геофизические и астрономические данные, полученные независимо друг от друга. Имеются в виду напряженное состояние сжатия вещества коры и верхней мантии, а также характер изменения скорости осевого вращения Земли. И то, и другое освещено в научной литературе, специальные же работы Н. Хаста и П. Н. Кропоткина [28, 15, 16 и др.] освобождают нас от подробного рассмотрения вопроса. Остановимся лишь на некоторых основных положениях.

Анализ многочисленных непосредственных измерений напряженного состояния горных пород привел к выводу о том, что в горных породах, особенно скальных, помимо горизонтальных напряжений, вызываемых нагрузкой вышележащих пород, почти повсеместно существует более значительное дополнительное напряжение горизонтального сжатия. Оно уже у поверхности обнажений достигает  $180 \text{ кг/см}^2$  и возрастает на глубине 1000 м до  $600 \text{ кг/см}^2$  и более. Равномерное нарастание напряжения свидетельствует о дальнейшем его увеличении с глубиной, что подтверждается многочисленными сейсмологическими данными [15, рис. 2 и 3]. На глубине 10—30 км возможно возрастание дополнительного горизонтального сжатия до  $2000—3000 \text{ кг/см}^2$  и более, хотя в астеносфере, по П. Н. Кропоткину, оно должно исчезать, т. к. общие напряжения здесь близки к гидростатическому давлению. Напряжения горизонтального сжатия почти всюду ориентированы вкрест простирания складчатых хребтов и зон высокого градиента изостатических аномалий. Местами это выявлено и в рифтовой зоне *Срединного Атлантического хребта*, хотя по сейсмологическим данным ось наибольшего сжатия эллипсоида напряжений здесь обычно располагается параллельно, а ось растяжения перпендикулярно к ней, что ведет к раздвижению или к сдвиговым деформациям [5, 16, 28].

Второй факт заключается в том, что выявленное путём сопоставления дат затмений Солнца и Луны в древности (по ассирийским и египетским записям) и в современную нам эпоху замедление вращения Земли на 1 сек в столетие меньше того замедления, которое должно вызываться торможением приливами и отливами, порождаемыми в теле Земли влиянием Луны и Солнца. Б. Мейерман и Н. Н. Парийский объяснили это частичной компенсацией ускорением вращения, вызываемым совершающимся ныне сокращением радиуса Земли на 5 см в столетие.

Определение векового ускорения осевого вращения Земли, сделанное в работе М. В. Кузнецова [17], указывает на сокращение радиуса на 4,35 см/столетие.

После введения атомной шкалы времени и обработки результатов многочисленных новейших небесно-механических наблюдений (а именно 40 000 покрытий звезд Луной), было доказано, что неприливной (контракционный) член в уменьшенной угловой скорости вращения Земли значительно больше, чем считалось до сих пор. Без его учета продолжительность суток в настоящее время должна была бы быть не 24 часа, а 26 часов. Эта невязка полностью устраняется, если принять скорость уменьшения радиуса Земли 6,37 см за столетие [4]. Это соответствует сокращению радиуса Земли на 637 км за миллиард лет и уменьшению ее окружности на 4 000 км (на 10%).

На основании реальности обоих фактов, как Н. Хаст, так и П. Н. Кропоткин пришли к выводу о том, что Земля переживает эпоху прогрессирующего сжатия, но Н. Хаст при этом возражает против гипотезы расширения дна океанов и дрейфа материков, тогда как П. Н. Кропоткин примиряет ее с общим растяжением коры, прибегая к механизму «магматического клина».

Можно считать, что современное состояние сжатия (контракции) Земли вполне способно вызывать складчатые деформации в коре. Реальны и связанные со сжатием локальные явления выдавливания глубинного пластического материала, вызывающего растяжение и разламывание коры, т. е. рифтообразование. Признание же возможности противоположного сжатию Земли процесса—грандиозного дрейфа плит литосферы—с физической, да и с геолого-исторической, точки зрения недостаточно обосновано.

К представлениям о современном сжатии Земли недавно пришли также О. К. Леонтьев и его сотрудники. На основании данных морфометрического анализа рельефа дна Мирового океана, а именно современных коралловых построек и учета глубин над вершинами гайотов, они вывели, что радиус Земли сократился за счет ее сжатия приблизительно на 1 км за кайнозойское время [18].

Но является ли современное сжатие Земли лишь эпизодом в ее поздней истории, или в этом состоянии она находилась постоянно? Не было ли чередования эпох сжатия и расширения Земли? Наконец, какова природа сжатия и каковы его возможные масштабы?

При современном уровне наших знаний здесь могут быть ответы, пока не выходящие за рамки более или менее обоснованных предположений. Желательно найти более вероятные их варианты.

П. Н. Кропоткин за наиболее вероятный принимает вариант, предполагающий периодическую смену сжатия и расширения Земли при сохранении средней длины ее радиуса, близкой к современной на протяжении всей геологической истории. Подтверждение этому он видит в периодичности тектогенеза, которую считает установленной. Но существует и противоположная концепция постулативно-необратимого раз-

вития земной коры, не нарушаемого глобальными тектоническими циклами [8—10].

Г. Н. Каттерфельд возможность пульсационных изменений объема Земли обосновывает внутренней неустойчивостью самого процесса гравитационного сжатия и дифференциации Земли, неизбежно приводящего к выделению весьма значительной тепловой энергии, составляющей, по приблизительным подсчетам,  $17 \cdot 10^{30}$  эргов в столетие (в тепловых единицах  $4 \cdot 10^{23}$  кал). Так как в мировое пространство рассеивается лишь часть этой энергии, то планета нагревается, и вслед за стадией сжатия следует сменяющая ее (но только на время и менее значительная) стадия расширения. Имеется и еще одно обстоятельство, которое также усиливает колебательный, неустойчивый характер сокращения радиуса Земли. Согласно Б. Гутенбергу, давление в центре планеты  $p_c$  в первом приближении обратно пропорционально четвертой степени ее среднего радиуса  $R$ , а именно:  $p_c = \frac{3fM}{8\pi R^4}$  где  $f$  — постоянная тяготения,  $M$  — масса

планеты. При уменьшении  $R$  давление во всех слоях Земли резко возрастает и в состав ядра переходят новые массы вещества из более глубоких частей мантии, что должно привести к еще большему уплотнению и увеличению ядра и уменьшению объема Земли. При увеличении  $R$ , наоборот, происходит уменьшение давления, что способствует еще большему возрастанию  $R$ . Такая неустойчивость механического и физико-химического состояния внутренних частей Земли и приводит к колебательному режиму изменения  $R$  на фоне его общего векового (в смысле небесной механики) сокращения [13].

Происходящее сейчас укорочение радиуса Земли не является кратковременным эпизодом. По П. Н. Кропоткину, для возникновения напряжений в коре около  $1000—2000$  кг/см<sup>2</sup>, при скорости укорочения радиуса на 0,5 мм в год и при общем уменьшении его длины на 6—12 км, потребовалось бы 13—25 млн. лет [15]; при этом ничто не говорит о том, что напряженного состояния в породах коры и сжатия Земли не было и раньше. Так называемая альпийская складчатость, неотделимая по времени проявления от ларамийской, протекала в течение всей кайнозойской эры, начавшись еще в мезозое, около 100 млн. лет назад. Она неотделима даже условной гранью и от мезозойской складчатости, как последняя неотделима от герцинской, а та, в свою очередь, от каледонской и т. д. По существу, складчатые деформации не в одном, так в другом подвижном поясе происходили постоянно в течение всей обозримой геологической истории. Это позволяет предполагать, что земная кора постоянно находилась под влиянием сжимающих условий, а Земля в целом — в состоянии контракции. Об этом же свидетельствует образование в процессе глубинного метаморфизма более плотных модификаций минералов самого различного геологического возраста, а также результаты экспериментальных данных, говорящие о неизбежности уплотнения глубинного земного вещества под влиянием возрастающего к центру планеты давления. Представляется вполне правдоподобным и формирование земного ядра главным образом благодаря этой же причине. Что касается флюктуаций

гравитационного поля Земли (по Dicke и Кропоткину), то они обуславливали лишь незначительную неравномерность общего хода этого направленного процесса, который, по мнению одних авторов, эпизодически осложнялся [13] или, по мнению других, практически не осложнялся эпохами расширения Земли [9].

Однако, для количественной оценки гравитационного сжатия нельзя принимать современную скорость укорочения радиуса Земли

$\left(\frac{\Delta R}{\Delta t} = 5 \text{--} 6,4 \text{ см/100 лет}\right)$  за среднюю для геологических эр. При

$\frac{\Delta R}{\Delta t} = 5 \text{ см}$  за столетие,  $0,5 \cdot 10^9$  и  $2,5 \cdot 10^9$  лет назад радиус Земли рав-

нялся бы соответственно 6630 и 7630 км. Если масса Земли существенно не менялась, то средняя плотность Земли в начале палеозоя составляла бы  $5 \text{ г/см}^3$ , но в раннем протерозое она была бы равной около  $3,3\text{--}3,5 \text{ г/см}^3$ , а еще раньше значительно меньше плотности вещества верхней мантии, что невероятно. Впрочем, современную величину укорочения радиуса Земли нельзя принимать за среднюю для предшествовавшей ее истории хотя бы и потому, что равномерное укорочение в  $n$  раз радиуса шара сопровождается уменьшением его объема в  $n^3$  раз. С другой сторо-

ны, согласно упомянутой выше формуле Б. Гутенберга  $p_c = \frac{3fM^2}{8\pi R^4}$ , дав-

ление в центре однородной планеты —  $p_c$  при ее сжатии растет гораздо быстрее, чем уменьшается радиус  $R$ .

В предлагаемых ниже расчетах гравитационной контракции приблизительная масса Земли  $598 \cdot 10^{25} \text{ г}$  принимается постоянной из следующих соображений. Аккреция Земли, протекавшая в сравнительно короткий космогонический этап жизни планеты, закончилась около  $4,5\text{--}5,0 \cdot 10^9$  лет назад. Можно полагать, что к этому времени почти вся твердая компонента части протопланетного облака, находившейся в поле тяготения Протоземли, была израсходована на ее формирование. Дальнейшим ростом Земли за счет космического вещества можно пренебречь, так как суммарный эффект роста был очень мал. Об этом можно судить по современному количеству выпадаемого метеоритного вещества и космической пыли порядка  $10^{19} \text{ г}$  в год и почти незаметному его содержанию в осадочных породах различного возраста. Не вызывает сомнения, что все метеоритное вещество, поступавшее за время формирования коры, не могло войти в состав подкоровой части Земли. Оно пошло только на частичное построение коры и составляет небольшую долю ее массы, в свою очередь, немного превышающей  $0,5\%$  массы всей Земли. С другой стороны, выделение из мантии вещества коры —  $3,0 \cdot 10^{25} \text{ г}$ , а также гидросферы и атмосферы —  $0,17 \cdot 10^{25} \text{ г}$ , хотя и уменьшило на  $0,5\%$  массу подкоровой части Земли, существенно не изменило массы всей планеты. Количество сверхлетучих (главным образом, водорода), подвергшихся за это же время утечке за пределы атмосферы, оценивается не больше  $0,5\%$  массы Земли. Далее, исходя из современных космогонических гипотез, принимается, что в начальный этап существо-

вания Земля по своему химическому составу была сравнительно однородной. При этом, допуская соответствие земного вещества среднему составу хондритовых метеоритов или железисто-магнетитовых ультраосновных горных пород, можно принять за исходную плотность  $3,32 \text{ г/см}^3$ . Такой или немного большей плотностью обладает сейчас вещество верхней мантии [24].

Следует учесть, что против гипотезы расплавленного железо-никелевого ядра многие ученые выдвигают более серьезные возражения, чем против гипотезы Лодочникова-Рамзея [24, 6].

Учитывая современные космические, планетологические и экспериментальные данные, в частности такие факты, что железо является элементом менее распространенным, чем водород, кислород, кремний, алюминий, азот, углерод, сера, и что железо-никелевые метеориты по своей суммарной массе играют второстепенную роль в сравнении с каменными,—следует признать высокое содержание железа в ядре Земли маловероятным. Об этом же свидетельствует факт возрастания плотности в ряду планет Луна—Марс—Венера—Земля в соответствии с возрастанием их размеров (чем больше планета, тем больше ее плотность).

Из результатов расчетов следует, что за время существования Земли ее поверхность могла уменьшиться на  $200 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ , с начала формирования материковой коры—на  $100 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ , с начала палеозоя—на  $16 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ , при соответствующем уменьшении радиуса на 1180, 690 и 120 км. Обращает внимание, что сокращение радиуса Земли с начала палеозойской эры на 120 км почти вдвое меньше принятого А. Т. Асланяном [2]. Тем не менее, эффект гравитационной контракции превысил бы самые смелые предположения о величине сжатия, необходимой для обеспечения процессов тектогенеза.

Очевидно, что при любом исходном состоянии Протоземли плотное ядро ее обладало меньшими, чем теперь, размерами. Мало того, на самой ранней стадии ее развития ядра (как будет показано ниже) еще не было, а затем происходило зарождение его и постепенный рост. В связи с этим представляет интерес отдельное определение изменения во времени объемов мантии и ядра, так как таким путем можно было бы подойти к выяснению общего эффекта деформации как мантии, так и коры.

Переход земного силикатного вещества без существенного изменения его состава в фазовое («металлическое») состояние, вероятно, происходил при том статическом давлении, которое существует на поверхности ядра современной Земли. Зная величину этого давления, можно попытаться найти изменения глубин фазового перехода в процессе общего гравитационного сжатия Земли и тем самым подойти к выявлению динамики роста ядра.

Величина давления на единицу поверхности ядра ( $p_я$ ) обычно определялась, независимо от результатов экспериментов (с использованием больших кратковременных давлений), на основании изменений силы тяжести и плотности внутри Земли и принималась равной около

$1,4 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$  [23, 24]. Используя приводимые ниже расчеты, мы получим близкую величину  $p_n^1$ .

Вычислим величину давления на поверхности ядра современной Земли.

Потенциал силы тяжести на поверхности ядра

$$u_n = \int 4 \frac{\pi r^2}{z} \delta_n dr + \int_{R_n}^{R_z} 4\pi r \delta_m dr = \frac{4}{3} z^2 \delta_n + \frac{4}{2} \pi R^2 \delta_m - \frac{4}{2} \pi R_n^2 \delta_m,$$

где  $4 \frac{\pi r^2}{z}$  — потенциал поверхности массы в интервале изменения  $r$  от 0 до  $R_n$ ;  $4\pi r$  — потенциал поверхности массы в интервале изменения  $r$  от  $R_n$  до  $R_z$ ;  $R_z$  — радиус Земли,  $R_n$  — радиус ядра;  $\delta_n$  — средняя плотность ядра и  $\delta_m$  — средняя плотность мантии.

Сила притяжения в точке  $b$  ( $0, 0, z$ ), имеющей плотность, равную единице, вследствие симметрии Земли направлена по оси  $z$  и измеряется частной производной

$$\frac{\partial u}{\partial z}; \quad \left( \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \right).$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{8}{3} \pi z \delta_n - 4\pi z \delta_m = 4\pi z \left( \frac{2}{3} \delta_n - \delta_m \right) = \frac{4}{3} \pi z (2\delta_n - 3\delta_m).$$

В соответствии с распределением плотностей в теле Земли согласно модели «А» Гутенберга-Буллена,

$$\delta_n = \frac{9,4 + 12,3}{2} = 10,8 \text{ г/см}^3, \quad \text{а} \quad \delta_m = \frac{3,32 + 5,69}{2} = 4,5 \text{ г/см}^3.$$

При таком распределении плотностей давление на поверхность ядра Земли

$$p_n = \int_{R_n}^{R_z} \frac{4}{3} \pi r (2\delta_n - 3\delta_m); \quad (1)$$

при радиусе Земли  $6,37 \cdot 10^8 \text{ см}$  и радиусе ядра  $3,47 \cdot 10^8 \text{ см}$

$$p_n = 4,5 (21,6 - 13,5) \cdot \frac{4}{3} \pi \frac{z}{2} \Bigg|_{3,47 \cdot 10^8}^{6,37 \cdot 10^8} = 4,5 \cdot 8,1 \times \\ \times \frac{2}{3} \pi \frac{(6,37^2 - 3,47^2) \cdot 10^{16} \cdot 6,68 \cdot 10^{-8}}{981000} = 1\,460\,000 \text{ кг/см}^2$$

(здесь  $6,68 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{сек}^2$  — гравитационная постоянная, а 981 000 — число *дин* в 1 кг).

<sup>1</sup> Расчет величины  $p_n$  с использованием ЭВМ выполнен М. С. Лапо.

Такова возможная величина давления на поверхность ядра современной Земли; т. е. это то давление, при котором совершается фазовый переход земного вещества в «металлическое» состояние, свойственное ядру. Эта величина близка к значению, полученному и методом приближенного определения ускорения силы тяжести в серии сферических оболочек модели Буллена-Гутенберга, а затем суммирования сил притяжения в мантии от слоя к слою [11].

Наш метод позволяет приблизительно определить радиусы ядра Земли при тех переменных размерах ее объема (и средней плотности), которыми она обладала на различных этапах сжатия, т. е. в различные геохронологические даты.

Оказывается, что для того исходного состояния Земли  $4,6 \cdot 10^9$  лет назад, при котором средняя плотность ее вещества  $\delta_3$  была  $3,32 \text{ г/см}^3$ , а радиус равнялся  $7,55 \cdot 10^8 \text{ см}$ , максимальное давление в недрах Земли было значительно меньше  $1\,460\,000 \text{ кг/см}^2$ . Это давление приблизительно равно

$$\int_0^{7,55} \frac{4}{3} \pi z \delta_3^2 dz \cdot \frac{10^{16} \cdot 6,68 \cdot 10^{-8}}{981000} = \frac{7,55^2 \cdot 3,32^2 \cdot 10^{16} \cdot 6,68 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 10^5} =$$

$$= 980\,000 \text{ кг/см}^2. \quad (2)$$

Следовательно, на начальном этапе существования Земли плотного ядра у ней еще не было, в связи с чем не было и сколько-нибудь значительного геомагнитного поля.

Прибегая к аналогичным вычислениям, можно показать, что в процессе гравитационного сжатия давление  $1\,460\,000 \text{ кг/см}^2$  может возникнуть при достижении средней плотности земного вещества  $3,85 \text{ г/см}^3$  и при уменьшении радиуса Земли до  $7100\text{—}7200 \text{ км}$ , т. е. около  $3,6 \cdot 10^9$  лет назад. Действительно, используя формулу (2), находим, что при этих условиях давление в центре Земли приблизительно равнялось

$$\int_{7,1}^{7,2} \frac{4}{3} \pi z 3,85^2 dz \cdot \frac{10^{16} \cdot 6,68 \cdot 10^{-8}}{981\,000} = 1\,460\,000 \text{ кг/см}^2.$$

Следовательно, к указанному времени, т. е. к концу катархея—началу раннего архея, относится возникновение ядра, радиус которого еще не превышал  $100 \text{ км}$  при его плотности  $8,3 \text{ г/см}^3$  и массе  $4,2 \cdot 10^{21} \text{ г}$ . Продолжая расчеты, используя формулу (1), получаем динамику роста, отраженную результатами приближенных вычислений (табл. 1) и кривой, изображенной на рис. 1.

Сила притяжения каждой из сближавшихся частиц возрастала до тех пор, пока она в центральной части планеты не становилась равноценной давлению, достаточному для фазового преобразования вещества в «металлическое» состояние, свойственное земному ядру. Это состояние, обеспечиваемое давлением около  $1\,460\,000 \text{ кг/см}^2$ , отвечает условиям, существующим ныне на глубине  $2900 \text{ км}$ , т. е. на границе современного ядра. Но на начальном — протопланетном этапе развития Земли

вещество его было настолько «разреженным», что таких условий не существовало даже в ее центре. Расчеты показали, что зарождение ядра могло иметь место лишь  $3,6 \cdot 10^9$  лет назад, после чего на протяжении  $1 \cdot 10^9$  лет, т. е. в течение всего архея, происходил особенно прогрессирующий его рост. Значительного магнитного поля еще не было. Этому периоду соответствовало формирование древнейших структур

Таблица 1

Соотношения между радиусами Земли и ее ядра в процессе гравитационного сжатия (при равномерном уменьшении объема Земли, обратно пропорциональном возрастанию ее средней плотности и при допущении постоянства ее массы)

Геохронологические даты, $10^9$ лет	Земля				Ядро				Мантия		
	масса, $10^{25}$ г	плотность, г/см <sup>3</sup>	радиус, км	скорость сжатия радиуса см/100 лет	масса, $10^{25}$ г	плотность, г/см <sup>3</sup>	радиус, км	скорость роста радиуса, см/100 лет	масса, $10^{25}$ г	плотность, г/см <sup>3</sup>	доля радиуса, км
-4,6	598	3,32	7549	3,32	0	—	0	—	598	3,32	7549
-3,6	598	3,8	7217	3,0	0	—	0	—	598	3,8	7217
-3,53	598	3,83	7196	3,0	0,0042	8,3	100	—	~598	3,81	~7096
-3,5	598	3,85	7186	~3,0	1,8	8,4	142	1,4	596,2	3,82	7044
-3,2	598	3,99	7098	2,93	3	8,7	570	10,9	595	3,83	6528
-3	598	4,09	7042	2,8	12	8,8	850	14	586	4,1	6192
-1,8	598	4,66	6744	2,48	69	9,7	2600	14,6	529	4,3	4144
-1,5	598	4,8	5675	2,3	90	9,75	2820	7,4	508	4,34	3855
-1,35	598	4,87	6643	2,13	100	9,8	2930	7,3	498	4,4	3713
-0,6	598	5,23	6486	1,97	150	10,3	3270	4,86	448	4,44	3216
-0,23	598	5,41	6414	1,9	176	10,4	3420	4,05	422	4,46	2994
-0,18	598	5,43	6404,5	1,88	180	10,6	3435	3,0	418	4,48	~2969
-0,1	598	5,47	6389,5	~1,87	185	10,68	3451	2,0	413	~4,49	~2938
-0,065	598	5,49	6383	~1,85	188	10,74	3458	~2,0	410	4,49	2925
0	598	5,52	6371	1,65	198	10,8	3470	1,7	406	4,5	2901
+2	598	6,48	6040		280	12,2	3780	1,5	318	4,5	2260

докембрийских щитов. В дальнейшем скорость роста ядра стала постепенно убывать. Вероятно, максимальное замедление процесса наступит около  $2 \cdot 10^9$  лет после современной нам эпохи и предельный размер ядра около 4000 км будет достигнут тогда, когда давление на его поверхность станет меньше критической величины  $1\,460\,000 \text{ кг/см}^2$  и рост ядра прекратится. Средняя плотность ядра при этом возрастет до  $12,5 \text{ кг/см}^3$ , а средняя плотность мантии до  $4,5 \text{ кг/см}^3$ ; вещество нижних более плотных ее слоев перейдет в фазовое состояние ядра.

Таким образом, рост ядра, вероятно, происходил хотя и с переменной скоростью, но непрерывно по мере накопления в окружающем нижнем слое мантии напряжения, близко соответствующего давлению  $1\,460\,000 \text{ кг/см}^2$ . На границе ядра постепенно существовал скачок возрастания плотности, связанный с переходом вещества в плотную фазу. При таком переходе объем единицы массы вещества уменьшался более, чем вдвое. Следовательно, несмотря на абсолютное увеличение массы и размера ядра при одновременном уменьшении массы и толщины мантии, имело место относительное сокращение пространства, располагавшегося под мантией. В силу этого, вместе с общим сжатием Земли происхо-

дило приспособление мантии к относительно сильнее сокращавшемуся объему вещества, переходившему из нее в ядро.

Очевидна неизбежность непрерывного возникновения в мантии дополнительных (к давлению) тангенциальных напряжений, о реальности которых говорилось в начале статьи. Энергия сжатия при этом расходовалась не только на разогревание, уплотнение, полиморфные преобразо-

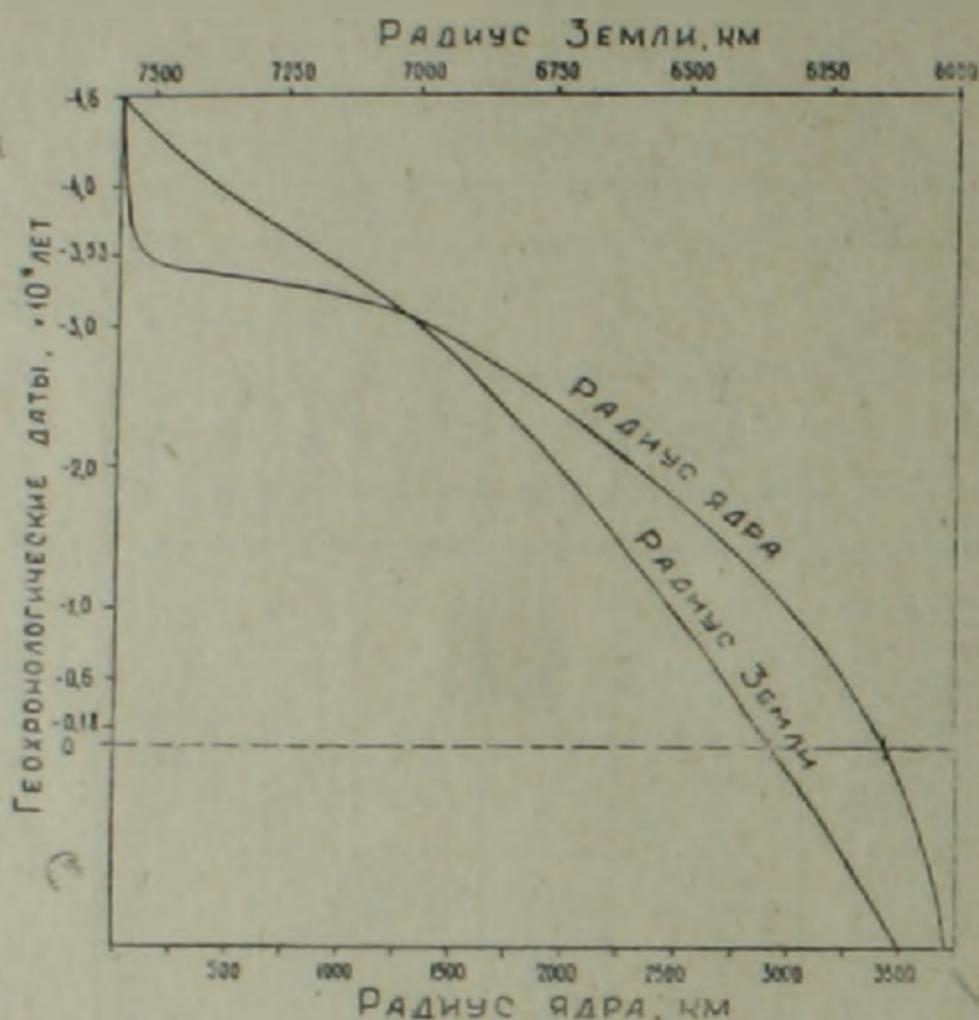


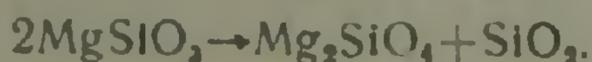
Рис. 1. Сокращение размеров Земли и рост ее ядра в ходе геологического времени.

вания вещества мантии, возраставшие с глубиной, а также на ускорение вращения Земли, но и на деформации всей толщи мантии. Наиболее существенным деформациям, вероятно, подвергалась верхняя мантия, плотность вещества которой оставалась почти неизменной. Ее поверхность могла испытывать изгибы в складки большого радиуса кривизны, подобно *plis de fond* Э. Аргана [1], влиявшие на формирование поверхностных структур литосферы. С ростом ядра и увеличением его поверхности в фазовое преобразование вовлекались все большие массы вещества мантии, толщина же ее уменьшалась. С этим могло быть связано ускорение протекавших с архея деформаций мантии и тектонических процессов в коре, достигших максимальной силы на поздних этапах геологической истории. Гравитационное сжатие Земли и формирование ее ядра продолжают и ныне, в связи с чем продолжают и связанные с этим планетарные тектонические явления (рис. 2).

Считая, что земное ядро не находится в физико-химическом равновесии с окружающим веществом мантии, А. Рингвуд и Г. Юри предполагают диффузию металлического кремния из ядра в мантию и железа из мантии в ядро [33, 35]. Этим самым допускается происходящее и ныне уплотнение и рост ядра не только в силу гравитационного фактора, но и благодаря перераспределению химических компонентов.

На больших глубинах, несомненно, происходят физико-химические процессы приспособления вещества к термодинамическим условиям раз-

личных зон мантии. Эти процессы могут выражаться в полиморфных превращениях минералов (образование плотных модификаций кремнезема—коэсита и стивопорита, оливин-шпинелевый переход, образование железисто-магнезиальных метасиликатов в ортосиликаты и др.). Однако, приспособление к глубинным термодинамическим условиям выражается в дифференциации вещества мантии не только по плотности, но и по составу. Например, по В. А. Магницкому [22, 23, 24], должно происходить всплывание окиси кремния, освобождающейся в мантии при реакции



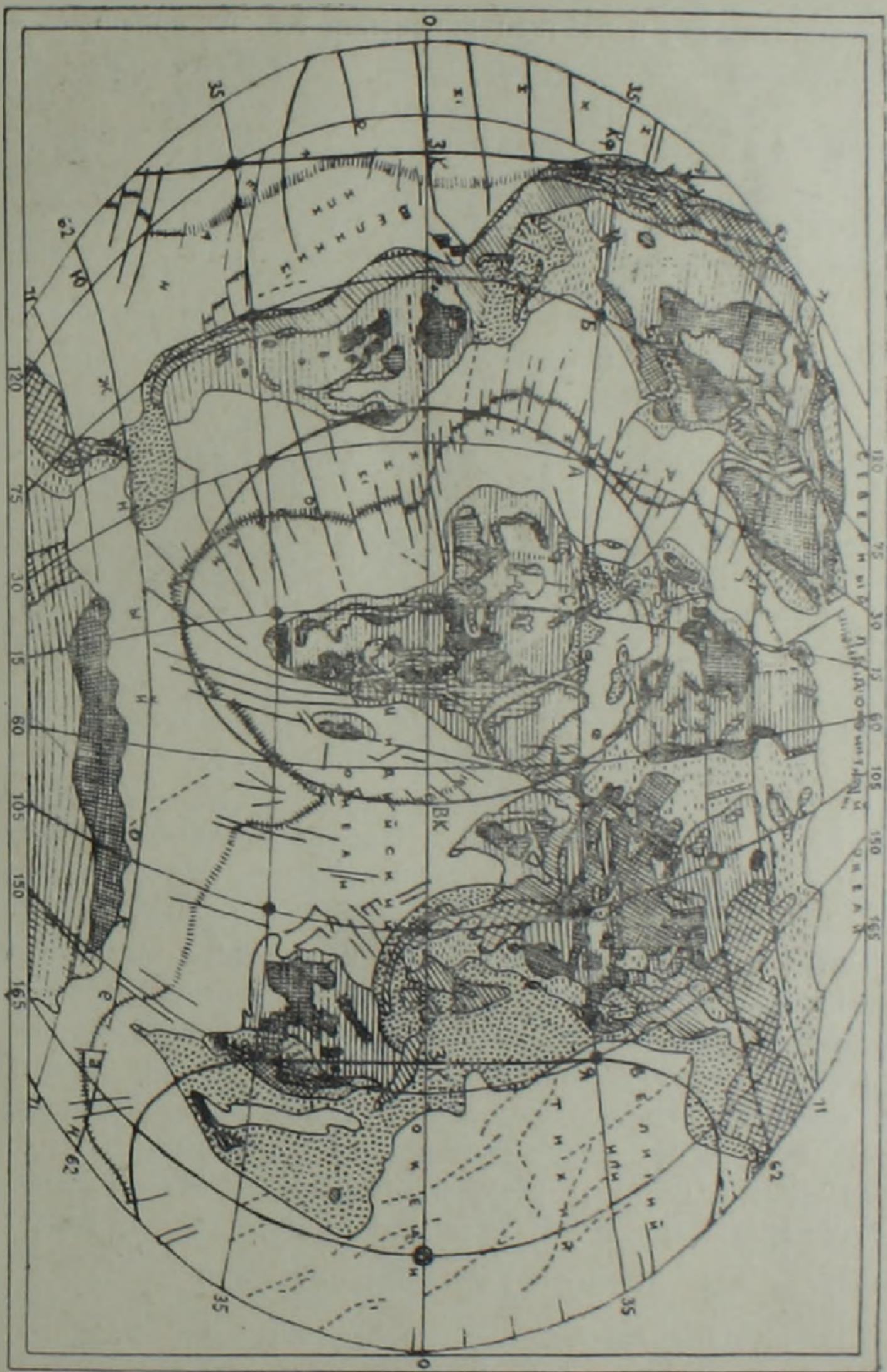
Еще Э. Зюсс предположил дегазацию внутренних частей Земли, а в настоящее время многие ученые, в том числе А. П. Виноградов, Г. Юри, Т. Барт и др., допускают большие масштабы просачивания из недр Земли к ее поверхности легкоплавких летучих и вообще частиц и ионов, обладающих большим удельным объемом. Процессы дефлюидизации и дегазации мантии обуславливают продолжающееся и ныне формирование коры, гидросферы и атмосферы. Этот процесс сопровождается уменьшением массы, вероятно, и объема подкоровой части Земли, а, следовательно, участвует в общей ее контракции [8, 32 и др.].

Сокращение объема подкоровой части Земли, вызванное отделением вещества от мантии (дифференциационная контракция), поддается реальной оценке, хотя лишь грубо приближенной. Принимая среднюю мощность коры 25 км, среднюю плотность ее вещества—2,85 г/см<sup>3</sup> и среднюю плотность выделившего кору вещества мантии—3,32 г/см<sup>3</sup>, находим, что с начала возникновения коры радиус подкоровой части Земли мог уменьшиться на 22 км, а поверхность—на  $4 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup>. За время существования Земли за счет дегазации выделились летучие, диссипировавшие и образовавшие гидросферу и атмосферу. Если принять, что масса этих летучих почти равна массе коры (около 0,5% массы Земли), то общий эффект контракции мог быть вдвое большим, и поверхность подкоровой части Земли могла при этом сократиться на  $8 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup>.

\*\*\*

Резюмируя вышесказанное, можно предположить, что сжатие Земли вызывается двумя (или тремя—если учитывать и термальную контракцию) различными факторами, и суммарный ее эффект может служить одной из главных причин образования общего *структурного плана* нашей планеты (рис. 2) и складчатого строения коры.

Следует особо подчеркнуть, что в силу закона сохранения момента количества вращения, любые изменения радиуса и объемного сжатия планеты неизбежно ведут к изменениям ее полярного сжатия (рис. 3). Другими словами, контрактционная и ротационная причины тектогенеза (обычно рассматриваемые в отрыве одна от другой)—сопряжены между собой и совместно определяют *глобальный структурный план Земли* (см. рис. 2).



- 1 [Symbol: Dotted pattern]
- 2 [Symbol: Horizontal lines]
- 3 [Symbol: Vertical lines]
- 4 [Symbol: Diagonal lines (top-left to bottom-right)]
- 5 [Symbol: Diagonal lines (top-right to bottom-left)]
- 6 [Symbol: Horizontal lines with dots]
- 7 [Symbol: Vertical lines with dots]
- 8 [Symbol: Diagonal lines (top-left to bottom-right) with dots]
- 9 [Symbol: Diagonal lines (top-right to bottom-left) with dots]
- 10 [Symbol: Dotted pattern with dots]
- 11 [Symbol: White box]
- 12 [Symbol: Wavy lines]
- 13 [Symbol: Dashed lines]
- 14 [Symbol: Diagonal lines (top-left to bottom-right) with dots]
- 15 [Symbol: Diagonal lines (top-right to bottom-left) with dots]
- 16 [Symbol: Circle with cross]
- 17 [Symbol: Circle with cross]
- 18 [Symbol: Circle with cross]

Рис. 2.

Общая гравитационная контракция наиболее значительна и ответственна главным образом за деформации в мантии; она может привести к нарушениям поверхности Мохоровичича. Последние, в свою очередь, должны вызывать деформации в коре, которые суммируются с деформациями, возбужденными в коре непосредственно общей гравитационной контракцией. Выделение вещества коры и летучих из мантии вызывают подкоровую дифференциационную контракцию, но меньших мас-

Рис. 2. Структурный план Земли и его соотношение с активными кругами и центрами земного эллипсоида, возникающими в результате изменений объема и скорости вращения планеты (Карта составлена по материалам Г. Н. Каттерфельда, 1962, В. Е. Хаина и Е. Е. Милановского, 1972).

### Материки

Выступы докембрийских кристаллических пород (щиты): 1—архейского и ранне-протерозойского возраста; 2—поздне-протерозойского возраста; 3—докембрийские кристаллические породы, перекрытые протерозойским и фанерозойским осадочным чехлом.

Области складчатости: 4—палеозойские; 5—мезозойские; 6—кайнозойские; 7—эпипалеозойские и эпимезозойские плиты (палеозойские и мезозойские складчатые системы, погребенные под более молодыми отложениями); 8—современные геосинклинальные области.

Материковые рифтовые зоны: 9—современные и кайнозойские; 10—мезозойские и более древние (грабены и авлакогены).

### Океаны

11—Океанические платформы.

Современные срединно-океанические хребты:

12—высокие, с рифтовой долиной; 13—низкие, без рифтовой долины.

### Другие обозначения

14—крупнейшие глубинные разломы; 15—предполагаемые глубинные разломы и трещины, контролирующие расположение цепей вулканов; 16 и 17—экстремальные (эпейрогенические и талассогенические) круги и центры:  $\varphi_e = +90^\circ$ —Северополлярный талассогенический центр,  $\varphi_e = +62^\circ$ —эпейрогеническая параллель (ось северных материков),

$\varphi_e = -62^\circ$ —талассогеническая параллель (ось Южного океана),  $\varphi_e = -90^\circ$ —Южнополярный эпейрогенический центр; ( $\varphi_e = 0^\circ$ ,  $\lambda_e = -165^\circ$ )—Тихоокеанский талассогенический центр;  $\lambda_e = 105-75^\circ$ —эпейрогенический меридиан (ось материкового «пояса Карпинского»);

( $\varphi_e = +62^\circ$ ,  $\lambda_e = -75^\circ$ )—Канадский эпейрогенический центр.

( $\varphi_e = +62^\circ$ ,  $\lambda_e = 15^\circ$ )—Балтийский эпейрогенический центр.

( $\varphi_e = +62^\circ$ ,  $\lambda_e = 105^\circ$ )—Сибирский эпейрогенический центр.

( $\varphi = 0^\circ$ ,  $\lambda = 15^\circ$ )—Африканский эпейрогенический центр;

18—критические круги и центры: ( $\varphi_0 = \pm 35^\circ$ )—северная и южная критические параллели, З. К. и В. К.—западный (вокруг Великого океана) и восточный (вокруг Африки) критические круги, Кф—Калифорнийский, Б—Бермудский, А—Азорский, С—Сицилийский, И—Иранский, Кт—Китайский, Я—Японский критические центры (К районам влияния критических центров относятся, в частности, «Бермудский треугольник» и «Море Дьявола»).  $\varphi = 0^\circ$ —круг антисимметрии северного и южного полушарий; ( $\varphi = \pm 71^\circ$ )—северный и южный круги антисимметрии полярных стран; ( $\lambda = 105-75^\circ$ )—круг антисимметрии восточного и западного полушарий (физическая граница восточного и западного полушарий Земли).

штабов. Она, вероятно, разрешается складкообразованием только в активных в данную геологическую эпоху геосинклинальных поясах и зонах, где суммируется с эффектом общей гравитационной контракции.

Контракция, вызываемая охлаждением Земли, может привести к максимальному сокращению ее подкоревой поверхности за все геологическое время на 2 млн. км<sup>2</sup>, что должно быть существенным дополни-

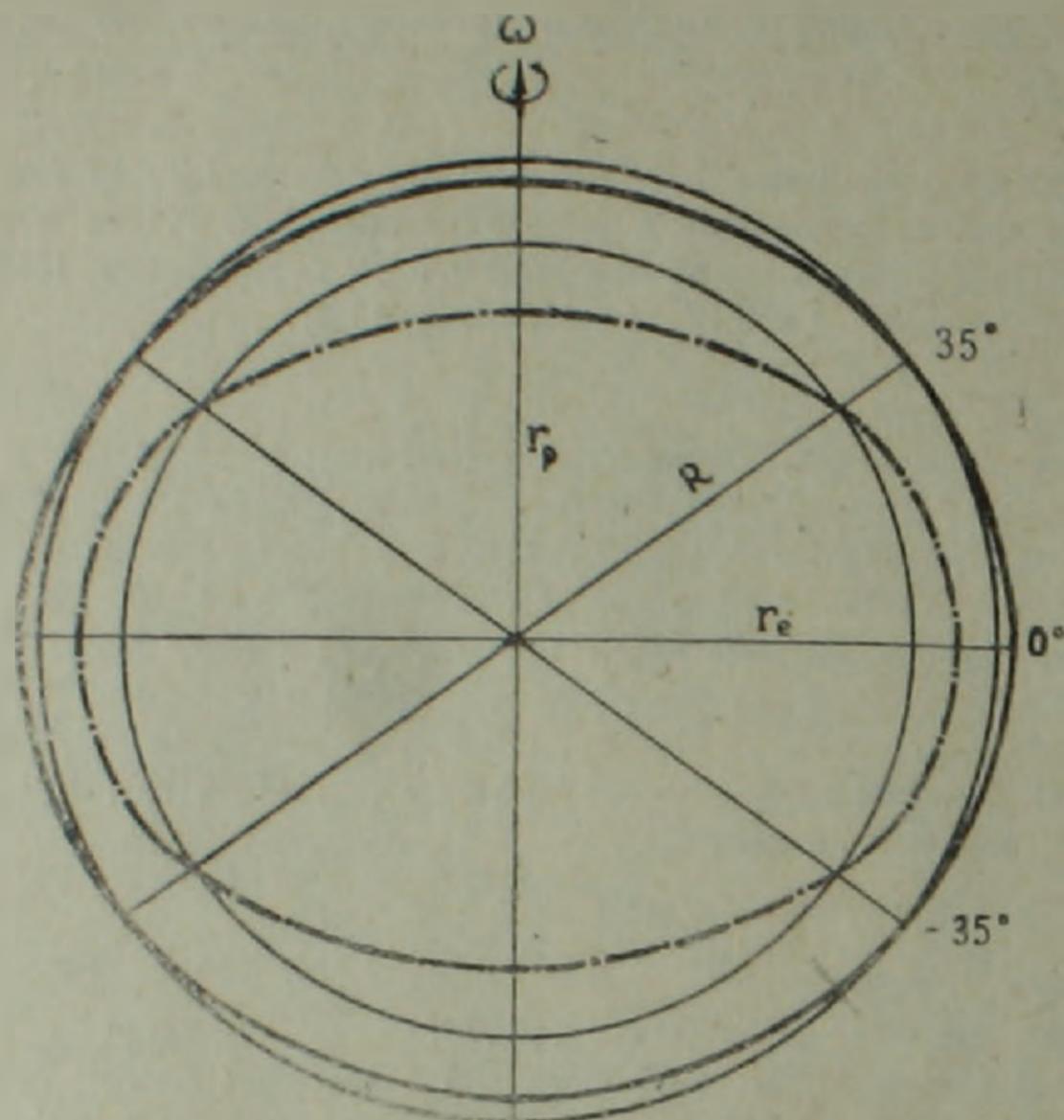


Рис 3. Схема пульсаций объема и формы Земли, иллюстрирующая сопряженность объемного и полярного сжатия планеты.

— Сфероид с  $R_1$  и  $\alpha_1$  ( $R$ —средний радиус планеты,  $\alpha$ —полярное сжатие,

$$\alpha = \frac{r_e - r_p}{r_e});$$

— сфероид с  $R_2$  и  $\alpha_2$  ( $R_2 < R_1$ ,  $\alpha_2 > \alpha_1$ ).

Увеличение объемного сжатия в силу закона сохранения момента количества вращения  $L = RMR^2\omega \left(1 + \frac{2}{3}\alpha\right) = \text{const}$  приводит к ускорению вращения планеты ( $\omega_2 > \omega_1$ , где  $\omega$ —угловая скорость) и к увеличению полярного сжатия  $\alpha$   $\varphi_0 = \pm 35^\circ$ —критические параллели, на которых изменения  $R$  при условии постоянства объема и при изменения  $\alpha$  равны нулю.  $\varphi_e = \pm 62^\circ$ —параллели максимального изменения площадей («оси» северных материков и Южного океана Земли). Из рисунка видно, что вертикальные деформации земного сфероида при изменении  $R$  и  $\alpha$  максимальны в умеренных зонах и минимальны в экваториальной зоне. При постоянстве  $R$  и при изменении одного только  $\alpha$  они были бы максимальны на параллелях  $\pm 62^\circ$  и экваторе и равны нулю на критических параллелях  $\pm 35^\circ$ .

тельным вкладом в общую контракцию Земли. Но, скорее всего, приведенная величина преувеличена.

По нашим расчетам сокращение радиуса Земли происходило со скоростями от 3,3 до 1,9 см/столетие, со средней скоростью 2,6 см/столетие.

тие. Эта оценка в 2—2,5 раза меньше, чем у Мейермана, Парийского и Асланяна потому, что она вытекает из расчета сжатия Земли за все время ее геологической истории (4,6 млрд. лет), тогда как указанные авторы 5—6 см/столетие получили как скорость современного укорочения ее радиуса. Отсюда следует вывод о неравномерном режиме гравитационного сжатия и о возможном увеличении его темпов в неоген-четвертичное время (что соответствует повышенной тектонической активности этого этапа в истории Земли). Сокращение радиуса Земли за последние 400 млн. лет (т. е. с девона) должно было составить около 73 км, т. е. 1,1—1,2% ее радиуса. С другой стороны, новейшие определения величины палеорадиуса Земли по многочисленным палеомагнитным данным и по разным материкам, полученные Мак-Иллини и другими авторами [29], дают для девона размеры, равные в среднем 1,02 современного радиуса. По мнению П. Смита [34] (статья которого вышла под выразительным названием «Конец гипотезы расширяющейся Земли?»), результаты Мак-Иллини и его сотрудников однозначно указывают на сжатие Земли и отвергают возможность ее векового расширения. Таким образом, фактические данные подтверждают гипотезу векового сжатия Земли и согласуются со сделанными на ее основе расчетными оценками.

В ходе гравитационного сжатия не исключены не только его неравномерности, но и эпизодические или регулярные смены сжатия фазами незначительного расширения, что допускается сторонниками пульсационного сжатия Земли, признающими периодичность тектогенеза (В. Бухер, Ф. Берч, В. А. Обручев, М. А. Усов, Г. Н. Каттерфельд, П. Н. Кропоткин и др.).

Авторы не касались вопросов механизма трансформаций напряжений в конкретных условиях и вполне сознают трудности не только решения этих вопросов, но и связанной с ними проблемы отсутствия интенсивно складчатой структуры в океанических блоках земной коры.

Мы признательны А. Т. Асланяну, П. Н. Кропоткину и О. К. Леонтьеву за просмотр работы и ряд сделанных ими ценных замечаний.

Дальневосточный Геологический институт ДВНЦ АН СССР,

Сектор космической геологии

Всесоюзного объединения «Аэрогеология»,

Приморское территориальное Геологическое управление

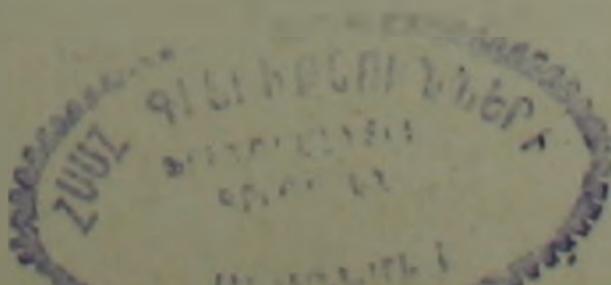
Поступила 7. V. 1991.

Ն. Պ. ՎԱՍԻԿՈՎՍԿԻ, Գ. Ն. ԿԱՏՏԵՐՖԵԼԴ, Մ. Ա. ԼԱՍՊ

ԵՐԿՐԻ ԳՐԱՎԻՏԱՑԻՈՆ ՍԵՂՄՈՒՄԸ ՈՒ ՏԵԿՏՈԳԵՆԵՑԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Հաշվի առնելով գրավիտացիոն դիֆերենցիացիան և միջուկի ու մանտիայի սահմանում բարձր ճնշման տակ տեղի ունեցող ֆազային փոխակերպումները (որոնք բերում են նյութի խտության աճին), հիմնավորվում է Երկրի գրավիտացիոն սեղմման գեոտեկտոնական վարկածը: Երկրի կենտ-



րոնական մասերում նյութի խտության ավելացման և միջուկի աճի հետևանքով զխտվում է Երկրի շառավղի դարավոր կրճատում: Դա բերում է Երկրի մակերևույթին և նրա բոլոր շերտերում ծանրության ուժի ավելացմանը, ինչպես նաև խտացման պրոցեսի հետագա ընթացքին նպաստող ճնշման աճին Երկրի կենտրոնում: Երկիրն իր զարգացման մինչերկրաբանական շրջանում միջուկ չի ունեցել: Այն, ըստ հեղինակների հաշվարկումների, կազմավորվել է մոտ 3,6 մլրդ տարի առաջ՝ կատարիսեյ-արիսեյ սահմանագծում:

Բ. Մեյերմանի (1928) և Ն. Ն. Պարիյսկու (1955) աշխատություններում բերված Երկրի պտույտի արագացման (որը նվազեցնում է նրա մակրնթացային արգելակման էֆեկտը) տվյալները տալիս են Երկրի շառավղի կրճատում՝ 4,5—5 սմ/դար: Ըստ Ա. Տ. Ասլանյանի (1978) ավելի ճշգրիտ հաշվումների արդյունքի, այդ կրճատումը կազմում է 6,37 սմ/դար:

Այդ սեղմումը դիտվում է որպես ծալքավորման և այլ տեկտոնական պրոցեսների պատճառ:

Ըստ հեղինակների հաշվարկների, Երկրի շառավղի կրճատումն ունեցել է 3,3-ից մինչև 1,9 սմ/դար (միջին հաշվով 2,6 սմ/դար) արագություն: Այս գնահատականը 2—2,5 անգամ փոքր է վերոհիշյալ հեղինակների բերած տվյալներից: Դրա պատճառն այն է, որ սույն աշխատության հեղինակները Երկրի սեղմումը հաշվարկել են նրա ողջ երկրաբանական դարգացման ժամանակաշրջանի համար, իսկ հիշված հեղինակները 5—6 սմ/դար արժեքը ստացել են որպես Երկրի շառավղի ժամանակակից կրճատման արագություն: Այստեղից կարելի է հետևություն անել գրավիտացիոն սեղմման ռեժիմի անհավասարաչափության և նեոգեն-չորրորդականի ընթացքում նրա տեմպերի հնարավոր ավելացման վերաբերյալ:

Երկրի շառավղի կրճատումը վերջին 400 մլն տարում (սկսած դեռևից) պետք է որ կազմի 73 կմ, այսինքն շառավղի մեծության 1,1—1,2 տոկոսը: Մյուս կողմից, ըստ տարբեր մայրցամաքներում ստացված բազմաթիվ հնամագնիսական տվյալների, Մակելինիի և այլոց (1978) գնահատությամբ Երկրի շառավիղը դեռևս կազմել է ժամանակակից շառավղի 1,02 մասը: Այսպիսով, փաստացի տվյալները հիմնավորում են Երկրի դարավոր սեղմումը և կատարված հաշվարկային գնահատականները:

Երկրի պատմության մեջ նրա ընդարձակման ժամանակաշրջանները չեն ժխտվում հեղինակների կողմից, սակայն Երկրի սեղմման հետ համեմատած դրանք ունեցել են երկրորդական նշանակություն և, ավելի շուտ, հանդիսացել են նրա ֆիզիկական հետևանքը:

N. P. VASILKOVSKY, G. N. KATTERFELD, M. S. LAPO

## GRAVITATIONAL COMPRESSION OF THE EARTH AND TECTOGENESIS

### Abstract

The geotectonic hypothesis of the gravitational compression of the Earth is substantiated. This hypothesis takes into consideration the gravitational differentiation and the phase modifications on the core-mantle boundary, which take place under the influence of high pressure. This

leads to the growth of the substance density. With the growth of the density in the central parts of the Earth (and with the growth of its core), the Earth's radius shortens in a secular way, which leads to the growth of the gravity on the surface and in all of the Earth strata as well as to the growth of the pressure in its centre, which stimulates the further process of compression.

Authors' calculations showed that the transition of the Earth's silicate substance into a phase („metallic“) condition, peculiar to the core, could have begun in the planet centre some  $3,6 \cdot 10^9$  years ago, i. e. on the Katarchean-Archean boundary.

The estimations of the secular acceleration of the Earth's rotation (decreasing effect of its tidal friction), made by B. Meyermann (1928) N. N. Parijsky (1955), had indicated the shortening of the Earth's radius for 4,5–5 cm/century. The recent more exact results of A. T. Aslanian (1978) gives us the value of 6,37 cm/century.

This compression is examined as one of the main causes for the folding and the tectonic processes.

According to the authors' calculations the shortening of the Earth's radius have taken place in a speed from 3,3 to 1,9 cm/century with mean velocity of 2,6 cm/century. This estimation is 2–2,5 times lower than these ones given by Meyermann, Parijsky and Aslanian because our calculation of the Earth's compression is made for the full time of the geological history while the cited authors had received 5–6 cm/century as the speed of the modern shortening of the radius. Thus, it follows a conclusion on the nonuniformity of gravitational contraction and on the possible increase of its rates in the Neogene-Quaternary (which corresponds to the increased tectonic activity at this stage in the Earth's history).

The shortening of the Earth's radius during the last  $400 \cdot 10^6$  years (i. e. from Devonian) has made up about 73 km, i. e. 1,1–1,2% of its radius. On the other hand, the recent estimations of the Earth's paleoradius according to numerous paleomagnetic data and for different continents, adduced by M. W. McElhinny et al. (1978), have given 1,02 of the modern Earth's radius for the Devonian one.

Thus, factual data confirm the hypothesis of the Earth's secular contraction and correspond to the estimations made on its basis.

The epochs of expansions in the Earth's history are not denied by the authors, but in the comparison with the secular contraction they have had a secondary significance, rather being its physical after-effect.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арган Э. Тектоника Азии. Гос. научно-технич. изд-во, М.—Л., 1935.
2. Асланян А. Т. Динамическая проблема геотектоники. Междунар. Геол. Конгр., XXI сессия. Докл. сов. геологов по пробл. 18. Изд. АН СССР, М., 1960.
3. Асланян А. Т. Предельное значение мощности и прочности литосферы в свете теории гравитационного сжатия и приливного торможения Земли. Изв. АН Арм. ССР, Науки о Земле, т. 29, № 1, 1976.
4. Асланян А. Т. К расчету скорости векового изменения радиуса Земли. Изв. АН Арм. ССР, Науки о Земле, т. 31, № 5, 1978.

5. Балакина Л. М., Васденская А. Я., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. Напряженное состояние в очагах землетрясений и поле упругих напряжений Земли. Изв. АН СССР, Физика Земли, № 6, 1967.
6. Бенеш К., Галибина И. В., Каттерфельд Г. Н. Тенденции развития планет земной группы. Известия АН СССР, сер. геол., № 5, 1975.
7. Буллен К. Э. Глубокие недра Земли. Сб. Планета Земля. Изд. ИЛ, М., 1961.
8. Васильковский Н. П. К теории земной коры. Труды СНИИГГИМС, вып. 5, 1959.
9. Васильковский Н. П. О направленности геологических процессов в истории Земли. Геология и геофизика, № 11, 1962.
10. Васильковский Н. П. К проблеме развития земной коры. Междунар. Геол. Конгр., XXII сессия Докл. сов. геологов по пробл. 4. Изд. АН СССР, М., 1961.
11. Джекобс Дж. А., Рассел Р. А., Уильсон Дж. Г. Физика Земли. Изд. во «Мир», М., 1964 (1959).
12. Каттерфельд Г. Н. Основные закономерности планетарного рельефа. Ученые записки ЛГПИ, т. 151, Л., 1958.
13. Каттерфельд Г. Н. Лик Земли и его происхождение, М., 1962.
14. Кропоткин П. Н. Основные проблемы энергетики тектонических процессов. Известия АН СССР, сер. геол., № 5, 1948.
15. Кропоткин П. Н. Возможная роль космических факторов в геотектонике. Геотектоника, № 2, 1970.
16. Кропоткин П. Н. Напряженное состояние земной коры по измерениям в горных выработках и геофизическим данным. В кн. Пробл. теоретическ. и регион. тектоники «Наука», М., 1971.
17. Кузнецов М. В. Расчет векового замедления вращения Земли по современным котидальным картам. Известия АН СССР, Физика Земли, № 12, 1972.
18. Леонтьев О. К., Лукьянова С. А., Каличик Л. И. О предполагаемых масштабах вертикальных движений дна океана и изменениях объема океанских впадин в кайнозойе. Сб. Проблемы палеогеографии, «Наука», М., 1976.
19. Лодочников В. И. Некоторые общие вопросы, связанные с магмой, дающей базальтовые породы. Зап. Всес. Мин. о-ва, т. 68, сер. 2, № 2—3, 1939.
20. Люстих Е. Н. Проблема энергетического баланса в геотектонических гипотезах. Известия АН СССР, сер. геофиз., № 3, 1951.
21. Магницкий В. А. Основы физики Земли. Госгеолиздат, М., 1953.
22. Магницкий В. А. Оболочка и кора Земли. Сов. геология, № 5, 1961а.
23. Магницкий В. А. Внутреннее строение Земли. «Знание», М., 1961б.
24. Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. «Недра», М., 1965.
25. Обручев В. А. Пульсационная гипотеза геотектоники. Известия АН СССР, сер. геол., № 1, 1940.
26. Парицкий Н. Н. Неравномерность вращения Земли. Тр. Геофиз. ин-та АН СССР, № 26 (153), 1955.
27. Хаин В. Е., Милановский Е. Е. Тектоническая карта Мира. БСЭ, т. 9, 3-е изд. Изд. «Советская энциклопедия», М., 1972.
28. Hast N. The state of stresses in the upper part of the Earth's crust.—Tectonophysics, 1969, vol. 8, 3.
29. McElhinny M. W., Taylor S. R., Stevenson D. J. Limits to the expansion of Earth, Moon, Mars and Mercury and to changes in the gravitational constant.—Nature, 1978, vol. 271, 5643.
30. Meyermann B. Die Schrumpfungsgeschwindigkeit des Erdradius aus astronomischen Beobachtungen.—Zeitschrift für Geophysik, 1928, Bd. 4, 3.
31. Ramsey W. H. On the nature of the Earth's core.—Month. Not. Roy. Astr. Soc. Geophys. Suppl., 1949, vol. 5, 5.
32. Riviere A. Sur un facteur possible de l'orogenese.—Acad. Sci., 1963, t. 256, 20.
33. Ringwood A. E. Silicon in the metal phase of enstatite chondrites and some geochemical implications.—Geochem. et Cosmochem. Acta, 1961, vol. 25, 1.
34. Smith P. J. The end of the expanding Earth hypothesis?—Nature, 1978, vol. 271, 5643.
35. Urey H. C. Evidence regarding the origin of the Earth.—Geochem. et Cosmochem. Acta, 1962, vol. 26, 2.