

УДК: 551.1+551.24

А. Т. АСЛАНЯН

БОЛЬШИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ОБЪЕМА И ПОЛЯРНОГО СЖАТИЯ ЗЕМЛИ И ИХ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Показывается самосогласованная замкнутая система геодинамических представлений, основанных на следующих посылах: около $4,5 \cdot 10^9$ лет т. н. период вращения Земли составлял около 6 ч, радиус R^0 —около 7390 км, средняя плотность— $3,5435 \text{ г/см}^3$, расстояние до Луны 70—80 тыс. км, полярное сжатие (эллиптичность)— $1/15$, экваториальный радиус—7550 км, минимальная скорость уменьшения радиуса в среднем $V_r = (7390 - 6370) \text{ км} / 4,5 \cdot 10^9 \text{ лет} = 2,27 \text{ см}$ за каждые 100 лет.

Уменьшение больших кругов Земли при переходе от марсианской плотности ($R = 7200 \text{ км}$, $\rho = 3,89 \text{ г/см}^3$) к современной за время, прошедшее после образования первых гранитоидов (эндербитов), имеющих возраст около $3,8 \cdot 10^9$ лет, составляет $\Delta C = 5260 \text{ км}$, уменьшение поверхности Земли на $1/4$. Подобное уменьшение больших кругов реализуется в образовании геосинклинальных прогибов, сводообразных поднятий, субдукции литосферных плит и др. Уменьшение полярной сплюснутости в свою очередь приводит к сжатию кругов коры и мантии на широтах менее 45° . Подобное изменение эллиптичности могло служить причиной образования сети мощных, глубоко проникающих магистральных разломов, составляющих, вероятно, матрицу мировой рифтовой системы.

Определенные тектонические эффекты предполагаются также вследствие переформирования фигуры планеты в связи с изменениями момента инерции масс, связанными с заметно большим и относительно быстрым вертикальным перемещением литосферных блоков, образованием наложенных вулканических и ледниковых масс и др.

Отмечается значение факта концентрации напряжений и деформации в нескольких узких поясах литосферы (геосинклинали и др.) и, как следствие этого, неизбежность больших горизонтальных перемещений литосферных плит со скоростью $V_{\text{в}} = 2\pi\beta V_r$, достигающей $4-5 \text{ см/год}$ при коэффициенте концентрации $\beta = 15-20$ и $V_r = 0,03 \text{ см/год}$. Подчеркивается вывод о том, что конвекция в мантии поддерживается контракцией (энергией гравитационного поля), а сама контракция возможна лишь при конвективном механизме выноса тепла из недр. Отмечается также прерывистый характер процесса контракции, эпизодически уступающего место процессу экспансии, ввиду задержки в выносе тепла и развития адиабатических явлений.

В фондах современного естествознания имеются весомые данные, эмпирические обобщения и теоретические разработки, которые показывают, что на заре своего становления, около 4,5 млрд. лет т. н., Земля вращалась в несколько раз быстрее, чем в современную эпоху, занимала пространство примерно в 1,5—1,6 раза больше, чем сейчас, за все время своего существования эпизодически или периодически проявляла высокую магматическую и сейсмическую активность, во внешней оболочке ее (в литосфере) неоднократно возникали, преобразовывались и уничтожались крупные протяженные альпийнотипные хребты, рифтовые системы, островные дуги, вулканические цепи, желобовидные прогибы, обширные овальные депрессии, сводообразные поднятия, глыбовые горы,

зоны разломов и т. д. Примечательными особенностями ранней истории Земли являются также наличие обширных мелководных океанов и морей, близость Луны к Земле (порядка 70—80 тыс. км), широкое развитие сине-зеленых водорослей в мелководных морях, существование дипольного магнитного поля с напряженностью порядка 0,5 гс (около 3 млрд. лет т. н.), возникновение выдержанных металлоносных поясов с определенными типами пород, руд, тектонических структур и др.

В генерализованном виде литосфера Земли (*s. stricto*)—это неоднородная, жесткая, композитная оболочка мощностью 70—80 км, состоящая из ряда пологих плитовидных блоков и расположенных между ними узких извилистых, сильно деформированных или деструктурированных поясов (типа альпийских складчатых цепей, срединноокеанических хребтов, островных дуг и др.) [см. 12, 15, 21, 27, 28, 42 и др.].

Субстратом литосферы является астеносфера, состоящая из гранат-шпинелевых перидотитов, отличающихся в сильно тектонизированных областях относительно высокой текучестью. Теоретически доказывается, что при переходе астеносферы в жидкое состояние вышележащая литосфера теряет устойчивость под влиянием одного лишь собственного веса, если мощность литосферы превышает 70 км (см. ниже стр. 15). Вместе с этим теоретически обоснована возможность развития в мантии периодически возникающих крупномасштабных конвективных течений (с латеральными размерами ячеек порядка $R \times R$), могущих увлекать за собой литосферные плиты на большие расстояния (при условии, если разность температур между подошвой и кровлей мантии поддерживается на уровне 2600°С, а вязкость масс в конвективном слое составляет 10^{21} — 10^{22} пуаз). В современной картине строения земной коры бросается в глаза резкий контраст между океаническими и континентальными ее областями: в первых кора имеет мощность в среднем 6 км, залегает между глубинами в среднем 3890 м и 9900 м и состоит в основном из продуктов базальтовой магмы, а во вторых мощность коры составляет для равнинных областей в среднем 37 км, высота поверхности над уровнем моря 875 м и состоит в нижней половине из вещества типа базальтов и серпентинитов, а в верхней половине в основном из вещества близкого по химическому составу к гранитоидам; в разрезе высокогорных хребтов альпийского типа мощность коры достигает от 45—50 до 80—85 км (Кавказ, Памир, Гималаи и др.).

Круг вопросов, связанных с изучением закономерностей развития литосферы, значительно расширился в связи с увеличением информации об энергии, выделяемой радиоактивными элементами в мантии Земли, обоснованием возможности развития крупномасштабных конвективных течений в недрах Земли, предположением о значительном изменении объема Земли вследствие фазовых переходов, активного взаимодействия ядра и мантии, изменении положения толщи Земли в отношении оси вращения [см. 10, 14, 19, 20, 21, 24, 26, 30, 31, 32, 36 и др.].

Попыток для объяснения происхождения указанных структур и геологических событий сделано чрезвычайно много, особенно за последние десятилетия, однако каждая из предложенных гипотез (их около 100),

удовлетворительно решает одну-две задачи, оставляя открытыми множество других [см. 12, 21, 24, 26, 30, 33, 34, 42]. Можно отметить также условность основных положений некоторых гипотез, претендующих на значительную общность и эвристичность. Так, Дж. Вассербург предложил удобную для анализа модель Земли, состоящую из каменных метеоритов такого типа, которые содержат радиоактивные элементы в количествах, достаточных для объяснения наблюдаемого теплового потока Земли (на уровне $1,3 \cdot 10^{28}$ эрг/год), хотя этот поток обеспечивается также уменьшением радиуса Земли со скоростью всего 0,02—0,03 см/год.

В то же время модели Земли, представленные из широко распространенных пород семейства ультрамафитов, например, из океанических перидотитов (лерцолитов), альпинотипных перидотитов и оливинитов (дунитов), выделяют радиогенного тепла меньше реально наблюдаемого соответственно в 20, 60 и 600 раз, т. е. для этих более реальных моделей вклад радиогенного тепла в общий тепловой поток пренебрежимо мал, и говорить об их решающей роли в развитии крупномасштабных и многократно повторяющихся конвективных систем не приходится (по данным известных исследований А. П. Виноградова, А. В. Сидоренко, Ю. М. Борщевского и др., вещество земной коры непрерывно омывается морской водой не менее 4 млрд. лет, обогащается органическим веществом и в ней последовательно увеличивается содержание тяжелых изотопов; это обстоятельство, естественно, затрудняет корреляцию между изотопными отношениями пород коры, мантии и метеоритов).

Аналогичная условность усматривается также в утверждении о том, что 1,6—2,3 млрд. лет т. н. объем Земли был в 6 раз меньше объема современной Земли (по палеомагнитным расчетам Эмблтона и Шмидта, 1981) [см. 22]. Если объем гидросферы современной Земли равнялся примерно объему гидросферы протерозойской Земли, то толщина ее должна была равняться 8880 м (толщина современной гидросферы в глобальном усредненном выражении 2685 м). Данные о литофациях и органическом мире протерозоя не могут быть согласованы с этой оценкой (указанные авторы определили по существу не объем всей Земли, а объем ее ядра, являющегося главным носителем магнитного момента). Равным образом, невозможно указать источник энергии, необходимый для расширения Земли до современного объема, поскольку для этого потребуется дополнительный разогрев земных недр в адиабатическом режиме в среднем на 4000° .

Здесь же следует указать на открытие отчетливо выраженных следов морских приливов и отливов (с перепадами уровня воды 12—25 м) в песчаных отложениях архея с возрастом 3 млрд. лет (формация Понгола в Южной Африке) [39]. Этот факт, конечно, не укладывается в представления о глубине докембрийского океана 8—9 км и не соответствует также представлениям тех авторов, которые считают, что Луна стала спутником Земли всего $1,78 \cdot 10^9$ лет т. н. (эта цифра фигурирует в известных работах Г. Джеффриса, Дж. Макдональда, Ф. Стейси и др.). Наряду с этими существенными замечаниями следует указать также на следующий крупный пробел: в теоретическом анализе тектонических про-

цессов, исходящих из положения об общем гравитационном сжатии Земли, не учитывался факт неравномерного распределения глобально выраженных деформационных поясов (занимающих всего 15% поверхности литосферы), указывающих: а) на концентрацию напряжений и деформаций в нескольких узких, наиболее податливых зонах литосферы; б) на неизбежность скольжения литосферных плит в направлении этих зон; в) на возможность дистального погружения краев литосферных плит в мантию (субдукция); г) на неизбежность образования при горизонтальном (продольном) изгибе литосферы наряду с желобовидными прогибами (тектогенами) аркообразных поднятий, которые становятся зонами дивергентного раздвига и мантийного диапиризма [см. 2, 3, 4, 10, 26].

Приведенные выше данные представляются самыми важными для конструирования геодинамических и геотектонических моделей, и одной из главных задач современных наук о Земле является создание самосогласованной глобальной теории, могущей объяснить и предсказывать основной комплекс геологических событий в их связи с другими явлениями коэволюционной активности планеты [см. 6, 12, 17, 18, 24, 33, 34, 35, 36]. Последующее изложение представляет одну из таких попыток, основанную с одной стороны на признании главенствующей роли в геодинамических и геотектонических процессах гравитационного сжатия (контракция) и переформирования фигуры Земли, стремящихся нарушить установившееся состояние относительного равновесия планеты (коробление и деструкция литосферы и мантии) и, с другой стороны, стремящихся привести планету в состояние наиболее устойчивого гидростатического равновесия (гравитационная дифференциация масс с обособлением ядра Земли, конвективные движения в мантии, дрейф и скольжение литосферных плит, возникновение альпинотипных цепей в роли пластических шарниров, нарушение сплошности литосферы в виде зон разломов, изостатическое распределение литосферных масс, образование диапировых структур, магматические инъекции, излияние лав и др.).

Предметом специальных исследований является выяснение тектонической роли процессов вертикальных и горизонтальных перемещений отдельных областей литосферы, увеличение на них напрузки ледниковых и лавовых новообразований и др. процессов, приводящих к заметному перераспределению момента инерции между отдельными областями Земли и поворотом ее в отношении оси вращения. Для такой оценки подходящие примеры представляют поднятие Тибета на 4000—4500 м на площади 2 млн. км², третичные лавы Декана на площади 1 млн. км² при мощности до 3 км, ледники Гренландии, мощностью до 3 км, альпийские горные цепи высотой до 9 км и др. (по оценке Т. Гольда, быстрое поднятие на 3 м всей Южной Америки может привести к тому, что спустя 1 млн. лет область Ю. Америки окажется над современным Южным полюсом; имеющиеся расчеты также показывают, что вследствие таяния гренландских ледников Северный полюс со временем переместится в Гренландию).

Из множества моделей Земли, при одинаковом их объеме, наиболее устойчивой является модель с минимумом потенциальной энергии.

Такой моделью является гидростатическая модель. С точки зрения термодинамики, процессы второй группы (конвекция, диапиризм, альпино-типный орогенез, интрузивный магматизм, излияние лав и др.) сопровождаются релаксацией напряжений, минимизируют потенциальную энергию системы и стремятся сделать состояние планеты более устойчивым. Процессы первой группы приводят к усилению напряженного состояния литосферы и мантии, к нарушению гидростатически уравновешенной фигуры планеты, относительно жесткие слои и оболочки испытывают различные деформации (изгиба, сжатия, растяжения, сдвига), в них накапливается потенциальная энергия (в виде энергии упругой деформации и потенциальной энергии, которую приобретают отдельные области литосферы при поднятии). По данным спутниковых наблюдений, экваториальное вздутие реальной Земли выше такового для модели жидкой Земли на 72 м, что, вероятно, и находит некоторое отражение в крупномасштабных конвективных движениях мантии, покачивании полюсов и др.

Таким образом, с точки зрения термодинамики, суть тектонической эволюции Земли заключается в постоянной борьбе между процессами нарушения и процессами восстановления (изостазия и др.) энергетически наиболее выгодной и гравитационно устойчивой, гидростатически уравновешенной конфигурации.

Остановимся несколько подробнее на упомянутых выше главных геодинамических факторах.

(1). СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ В ПРОШЛОМ

Изучение структур суточных и месячных (синодических) линий роста ископаемой и современной коралловой фауны—лелеципод, брахиопод и строматолитов показало, что Земля совершала за стандартный год 460 оборотов $1900 \cdot 10^6$ лет т. н. (разность в продолжительности суток $\Delta T = 5$ ч), 399 об. $375 \cdot 10^6$ лет т. н. ($\Delta T = 2,44$ ч), 391 оборот $337 \cdot 10^6$ лет т. н. ($\Delta T = 1,95$ ч), 380 об. $225 \cdot 10^6$ лет т. н. ($\Delta T = 1,31$ ч), 375 об. $72 \cdot 10^6$ лет т. н. ($\Delta T = 0,64$ ч). Среднее статистическое значение для голоценовых кораллов (< 12.000 лет) 359,3 оборота ($\Delta T \approx 0$) [см. 38]. Очевидно, происходит закономерное уменьшение угловой скорости вращения Земли от древнейших времен к нашей эпохе, что объясняется приливным торможением, возбуждаемым Луной и Солнцем (ниже будет показано, что торможение было на 40% слабее, чем ожидалось по теоретическим расчетам, поскольку не учитывалось соответствующее увеличение скорости вращения, вследствие уменьшения радиуса инерции Земли согласно условию $\omega R^2 = const.$). Увеличение продолжительности суток по указанным палеонтологическим данным составляет для палеозоя и мезозоя $21 \div 23$ сек за 10^6 лет. Непротиворечивые результаты дают расчеты, основанные на методах небесной механики.

Из упрощенной теории Гаусса о вращении спутника (Луны) вокруг центрального тела (Земли) выводится простая расчетная формула

$$\Delta T/T_0 = 4,95(1 - a^{3/2}),$$

где $\Delta T = T - T_0$ — разность между продолжительностью современных суток и суток в прошлом, a — отношение радиуса первоначальной орбиты (круговой) спутника к современной орбите (момент инерции спутника и центрального тела относительно осей их вращения $J = \kappa MR^2$ считается неизменным) [см. 9,25].

Если Луна образовалась на расстоянии $l = 10 R$ от Земли, то для современных параметров при $a = 1/6$, $T/T_0 = b = 3,93$, а при сильном полярном сжатии $l_{кр} = 17 R$, $a = 1/3,55$ и $b = 3,32$.

На основе указанной выше теории Гаусса автором было показано, что если величину фазового угла запаздывания приливного выступа Земли определить из данных чандлеровских колебаний полюса ($\sin 2\delta = 1/Q = 1/35$, $\delta = 50'$), то из формулы $a = (1 + 7,563 \cdot 10^{-9} t/Q)^{1/3}$ (основанной на теории Гаусса) при $t = 4,6 \cdot 10^9$ лет получим $a = 1/6 = 10 R$ — оценка, хорошо согласующаяся с результатами численных экспериментов на ЭВМ П. Гольдрайха (1966) [см. 9].

В 1848 г. Э. Рош показал, что в случае нахождения Луны на расстоянии $2,2 R$ от Земли она будет обращаться вокруг Земли с той же угловой скоростью, что и сама Земля. В первом приближении это следует из упомянутой выше формулы $v = 5,95 - 4,95 a^{1/2}$ при $a = (2,2/60,3) R$. Отсюда следует, что в указанное время продолжительность суток была $T_0 = T/b = 24/4,95 = 5$ ч (более строгий расчет дает $T_0 = 4,88$ ч). Увеличение продолжительности суток за время удаления Луны от Земли ($4,5 \cdot 10^9$ лет) до ее современной орбиты составляет при $a = 2,2 R$ в среднем 15 сек, а при $a = 10 R$, 14,3 сек за каждые 10^6 лет. (Можно показать, что указанный выше эффект увеличения скорости вращения Земли вследствие уменьшения ее радиуса практически эквивалентен эффекту от замены начального расстояния $a = 10 R$ на $a = 2,2 R$).

Эллиптичность Земли является квадратичной функцией угловой скорости вращения. Если она вращалась 4,5 млрд. лет т. н. в 4,95 раза быстрее, то эллиптичность по сравнению с современной ($1/298, 257$) должна была быть больше $(4,95)^2 = 24,5$ раза, т. е. она должна была равняться $1/12$ (эллиптичность Юпитера $E = 1/15,2$). Согласно этим оценкам, в то время полярный радиус Земли R_p должен был быть меньше среднего радиуса $R_m^0 = 7384$ км на величину порядка $\frac{2}{3} \varepsilon R_m^0 = 407$ км, а экваториальный радиус $R_e^0 = 7590$ км на величину $\frac{1}{3} \varepsilon R = 203$ км.

При замедлении вращения до современного значения экваториальный круг должен был уменьшаться на 1275 км, т. е. на 4%. При $a = 10R$, $b = 3,93$, получим $\varepsilon = 1/15$, $R_e^c = R_0 + \frac{1}{3} \varepsilon R^0 = 46 R^0/45 = 7548$ км, $R_e^c - R^0 = 142$ км, $\Delta C = 2\pi (R_e^c - R^0) = 1030$ км, т. е. экваториальное кольцо литосферы уменьшается на 2,2% [см. 6, 7, 9].

Переход от такой сильно сплюснутой формы к современной шарообразной должен сопровождаться короблением и разverzанием литосферы, образованием глобальной сети мощных, глубоко проникающих магистральных разломов, составляющих, вероятно, матрицу мировой рифтовой системы.

Л. С. Лейбензон (1910) показал, что в кольце литосферы на широте 45° вследствие расплющивания Земли возникнут деформирующие силы, которые нарушат его сплошность за время $\Delta T \cong 10^{-5} \cdot T \sigma_s$ (T — продолжительность суток, σ_s — прочность литосферы). Для значений $T = 24 \text{ ч} = 1440 \text{ мин}$, $\sigma_s = 2600 \text{ кг/см}^2$, получаем $\Delta T = 38 \text{ мин} = 0,63 \text{ ч}$. Такое уменьшение T произошло за последние 72 млн. лет, т. е. за кайнозойское время [см. 3, 9].

Представляется вероятным, что матрица сети планетарных деформационных структур возникла именно вследствие расплющивания Земли, причем в полярных областях ($\varphi \gg 45^\circ$) развивались близширотные дугообразные структуры растяжения, а в экваториальных областях ($\varphi \ll 45^\circ$) структуры сжатия (изгибы и сколы).

При $a = 10R$, $a_0 = 60,3R$, $a_0 - a = 320.000 \text{ км}$, скорость удаления Луны от Земли за $4,5 \cdot 10^9 \text{ лет}$ составит $7,12 \text{ см/год}$, скорость изменения орбитального движения Луны $\dot{n} = 44,8'' \text{ век}^{-2}$, а изменение угловой скорости вращения Земли $\dot{\omega} = 4,95 \cdot 10^{-22} \text{ рад/сек}^2$ (при $a = 2,2R$). Следует обратить внимание на то обстоятельство, что в процессе приливного взаимодействия пара Земля-Луна представляет колебательную систему: Земля и океан на Земле представляют маятник с периодом колебания 13,42 ч (лунные полусуточные приливы-отливы). Для таких систем потенциальная энергия $W(P)$ равняется кинетической энергии $U(K)$ и соответственно диссипативная функция Q , фигурирующая в зависимости $U(K) = (2\pi/Q) \cdot W(P)$ должна равняться 2π . В таком случае в полученной из теории Гаусса формуле для оценки изменения скорости большой полуоси орбиты Луны $d\bar{a}/dt = A_0 a_0^{11/2} / Q$ должно быть положено $Q = 2\pi$, а не $Q = 4\pi$, как то принимается в астрономии (в последнем случае получается $d\bar{a}/dt = 3,2 \text{ см/год}$, в первом случае $6,4 \text{ см/год}$). Это обстоятельство устраняет также противоречие между геологическими данными и астрономическими расчетами о местоположении Луны в прошлом [9, 25, 39].

(2). БОЛЬШИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА ЗЕМЛИ (КОНТРАКЦИЯ И ПУЛЬСАЦИЯ ЗЕМЛИ)

В. А. Амбарцумян [1] считает, что Солнце и протопланеты образовались одновременно, в результате распада более массивного тела или агрегата тел. В русле этой гипотезы находится представление, согласно которому указанное тело раскололось в двойную звезду, один из компонентов которой, фрагментируясь дальше, образовал протопланеты, а второй был обособлен в виде Протосолнца (такое деление быстро вращающихся звезд отмечено недавно в скоплении Плеяды англий-

скими астрономами). Если первичное тело было сильно сжатым агломератом, находившимся под давлением $10^{14}—10^{14,5}$ дин/см² (Л. Кнопов и Р. Уффен, 1954), то после выхода из его состава очень плотных фрагментов (с плотностью $20—30$ г/см³) должны были произойти переход первичного вещества в фазу меньшей плотности, выделение газов в наружную оболочку и, вероятно, преобразование фрагментов в планеты типа Юпитера, Сатурна, Урана. В одной из относительно детально изученных моделей возникновения планет в пыле-газовых облаках обосновывается возможность образования сначала мириады мелких нитевидных или паутинообразных структур (типа пылевых мышей—«*dust mouse*», отмеченных в процессах искусственного кристаллообразования—Дон и Сирс, 1963), а в дальнейшем аккумуляция их в более компактные и массивные перманентно уплотняющиеся протопланеты (возможность образования относительно мелких твердых тел, могущих объединиться в протоастероиды и далее в планеты, в этой модели отрицается) [Т. М. Энеева, 1983].

Согласно теореме вириала связь между кинетической энергией U и потенциальной энергией W медленно вращающейся звезды определяется в состоянии механического равновесия выражением

$$2\pi(3\gamma - 3)U + 2\pi W = QI + 2\pi W = 0$$

(здесь γ —параметр Грюнайзена, который для минеральных масс и эвтектик Земли, имеющих характер твердых растворов, имеет значения в пределах $2,5—3$).

Условием сжатия звезды является неравенство

$$T < T_{cr} = W/MC_v.$$

Для Земли $W = -2,54 \cdot 10^{39}$ эрг, $M = 5,98 \cdot 10^{27}$ г, $C_v = 1,25 \cdot 10^7$ эрг/(г. град), $T = 3410^\circ K$. Если средняя температура Земли меньше T_{cr} , то она будет сжиматься (для центра Земли, где давление $4 \cdot 10^{12}$ дин/см² по законам Клапейрона-Менделеева и Дюлонга-Пги, $T_c = 7500^\circ K$). Это условие равносильно известному условию Джинса, согласно которому звезда сжимается, если для нее первая космическая скорость V_* больше лапласовой скорости звуковой волны V_s . Для Земли $V_* = 7,89$ км/сек, $V_s = 4,85$ км/сек.

Различают два типа сжатия: адиабатическое сжатие, когда сжатие продолжается до установления гидростатического равновесия и вся выделяемая гравитационная энергия превращается в тепло ($\Delta W = \Delta U$), и изотермическое сжатие, которое имеет место в случае, когда длина тепловой волны по порядку равняется радиусу тела R .

Если объем тела уменьшается в x раз, то при этом высвобождается гравитационная энергия $\Delta W = (1-x)W$, в то время как энергия, возникающая за счет непосредственного сжатия $U' = 3MA_0 T \ln x/\mu$. Режим изотермичности сохраняется при $\Delta W = U'$ и если энергия ΔW обязательно удаляется из звезды. Отсюда следует, что звезда, как конденсированная система, неустойчива к сжатию и не может сжиматься слишком сильно.

Если $W \gg (3\gamma - 3)U$ и $\gamma \gg 4/3$, то в тепловую энергию переходит лишь $1/(3\gamma - 3)$ часть гравитационной энергии, остальная же, большая часть переходит в аperiodические движения, причем развивающееся динамическое давление в случае газовых шаров считается достаточным для разбухания их до первоначальных размеров. Это вновь указывает на то, что при $\Delta W \gg \Delta U$ звезда не может в целом постоянно сжиматься [см. 11].

Таким образом, контракция, хотя и направленный процесс, но совершается с переменной скоростью, а временами и уступает место экспансии. По расчетам Дж. Макдональда (1964), при эпизодах экспансии радиус Земли может увеличиться не более 10 км, а по оценкам С. Ранкорна (1980), для объяснения расхождения литосферных плит за последние 150 млн. лет требуется невероятно большое увеличение радиуса на 10%, т. е. увеличение больших кругов литосферы на 4000 км.

Согласно палеонтологическим данным процесс контракции ощутимо замедлился или уступил место экспансии временами в плейстоцене, эоцене, юре, среднем протерозое [см. 38].

Определению темпа контракции посвящен целый ряд публикаций [см. 6, 13, 22, 27, 41]. Все те исследования, которые основаны на традиционных законах физики твердого тела и гравитационной астрономии, приводят к выводу, что объем Земли в прерывисто-непрерывном режиме уменьшается; для скорости уменьшения радиуса указывались цифры от 1,9—2,7 см до 4,3—6,4 см за 100 лет, причем высокие значения получены в предположении, что Земля не взаимодействует с Луной и Солнцем, а ядро Земли обособилось еще в раннем катархее [см. 19, 31].

Анализ котидальных карт показывает, что суммарный приливный момент Луны и Солнца должен был замедлить вращение Земли на 40% больше наблюдаемого значения. Эта разница соответствует разности периодов нутации абсолютно твердой модели Земли 305,5 дней (период Эйлера) и модели реальной (упруго-вязкой) Земли 434 дня (период Чандлера) [6, 10, 19, 25].

Согласно приведенным выше расчетам минимально возможный период вращения Земли $4,5 \cdot 10^9$ лет т. н. был $T_0 = 4,88$, современный период $T = 24$ ч радиус $R = 6371$ км. Поскольку $0,4 \cdot (T - T_0)/T = 2(R_0 - R)/R$, то $4,5 \cdot 10^9$ лет т. н. радиус Земли должен был равняться $R_0 = 7386$ км, $R_0 - R = \Delta R = 1015$ км, а средняя скорость уменьшения радиуса за время $4,5 \cdot 10^9$ лет составит минимум $V_r = 2,26$ см за столетие (если исключить отдельные этапы эволюции, когда объем Земли эпизодически увеличивается или во всяком случае остается постоянным).

Пользуясь этими данными, легко показать, что в прегеологическое время ($4,5 \cdot 10^9$ лет т. н.) средняя плотность Земли при радиусе $R_0 = 7386$ км равнялась $\rho_0 = 3,543$ г/см³ (средняя плотность большинства каменных метеоритов), $3,79 \cdot 10^9$ лет т. н. $\rho_1 = 3,89$ г/см³ (средняя плотность Марса в современную эпоху), а $0,81 \cdot 10^9$ лет т. н. $\rho_2 = 4,60$ г/см³. Уменьшение объема Земли при переходе от начальной плотности 3,543 г/см³ к современной—5,517 г/см³ составляет 1,558 раза.

Согласно известной теореме Калландро, плотность поверхностного слоя для всех этих этапов (при гомологическом сжатии) $\rho_s < 0,657 \rho_m$ (ρ_m — средняя плотность планеты на том или ином этапе). Для

такой модели современной Земли по Калландро $\rho_s \leq 3,623 \text{ г/см}^3$ (в действительности $\rho_s = 0,5 \rho_m = 2,76 \text{ г/см}^3$ — средняя плотность коры), а для марсианской модели ($\rho_1 = 3,89 \text{ г/см}^3$) $\rho_s \leq 2,56 \text{ г/см}^3$ (плотность лунных габбро-анортозитов около 2 г/см^3 , плотность Луны $3,34 \text{ г/см}^3$). Многие исследователи началом геологического времени считают рубеж $3,79 \cdot 10^9 \text{ лет. т. н.}$ (возраст эндербитов из древнейших формаций). В это время средняя плотность Земли равнялась плотности Марса ($3,89 \text{ г/см}^3$), а радиус 7200 км . Следовательно, за время $3,79 \cdot 10^9 \text{ лет}$ больше круги литосферы уменьшились на величину $\Delta C = 2\pi (7200 \text{ км} - 6370 \text{ км}) = 5260 \text{ км}$. Эта разница может реализоваться в образовании изгибных структур (геосинклинали, геоантиклинали, океанические желоба и др.), заполненных во многих районах альпинотипными смятыми комплексами отложений, в аннигиляции краев литосферных плит вследствие их дистального ныряния в мантию и т. д. Указанному значению $\Delta C = 5260 \text{ км}$ соответствует уменьшение поверхности Земли на 26% , т. е. за все геологическое время ($3,79 \cdot 10^9 \text{ лет}$) поверхность планеты уменьшилась вследствие контракции на $1/4$. Примечательна при этом локализация эффекта контракции всего в нескольких узких поясах типа альпийско-гималайской или круготихоокеанской горно-складчатых цепей.

Можно отметить, что альпинотипные деформационные структуры байкальского, каледонского, герцинского, киммерийского и альпийского циклов, возникшие за последние 800 млн. лет , занимают 12% поверхности Земли, или 6% длины больших колец литосферы. Указанную выше невязку между наблюдаемыми и расчетными значениями торможения Земли пытались объяснить либо предполагаемыми изменениями гравитационной постоянной (П. Иордан, Р. Дике и др.), либо изменениями (уменьшением) радиуса Земли (Б. Мейерманн, Н. Н. Парийский, А. Т. Асланян и др.), либо различными сочетаниями этих факторов (П. Н. Кропоткин и др.) [см. 6, 22].

По поводу первого предположения было высказано следующее возражение: относительное изменение расстояния S между Солнцем и Землей приводит к изменению температуры поверхности Земли и к изменению количества солнечной энергии, получаемой Землей, согласно пропорциям

$$\Delta s/s = -2\Delta t^{\circ}/t^{\circ} = \Delta E/2E.$$

Если вследствие изменения гравитационной постоянной радиус орбиты Земли (среднее значение 149 млн. км) изменится на 5 млн. км , то температура изменится на $\Delta t^{\circ} = 4,77^{\circ}$ и в одном случае на всей Земле будет вечная зима (в лед превратится вся вода в океанах, морях и реках), а в другом случае будет вечное лето (поверхность Земли превратится в пустыню), исчезнут все знакомые нам формы фауны и флоры, эволюция которых продолжается вот уже несколько миллиардов лет [9, 23].

Против идеи существенного изменения гравитационной постоянной (гипотеза Дирака) приводились также серьезные возражения космологического характера. Было высказано предположение о периодическом изменении этой постоянной (гипотеза Кануто) и в связи с этим предпо-

ложение о периодическом изменении объема Земли (П. Н. Кропоткин) [22].

(3). КОНТРАКЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ И КОНВЕКТИВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ

В середине нашего столетия наибольшее распространение имели представления о мантийных конвективных течениях как главного движущего механизма разбегающихся литосферных плит. *Теплофизические и термодинамические расчеты показали довольно большую вероятность возникновения конвективных течений и их эффективность, поскольку критерий Нуссельта, определяющий эффективность работы механизма, существенно больше единицы (порядка 15—20) [см. 19, 21, 26, 30, 42, 43].* Требуемая эффективность получалась при условии, что разность температур между основанием мантии на глубине около 2870 км и верхами ее на глубине около 200 км составляет 2600° и поддерживается на этом уровне в течение тектонических циклов продолжительностью 800 млн. лет и 200 млн. лет, а вынос тепла в околоземное пространство осуществляется в основном не кондуктивным, а конвективным механизмом. Для этого соответственно тепловой поток из недр Земли должен составить $4 \cdot 10^{20}$ эрг/сек = $1,26 \cdot 10^{28}$ эрг/год. Поскольку в толще Земли радиогенного тепла выделяется в десятки раз меньше этого количества, то ставится вопрос о поисках других источников энергии, питающей конвективные течения [37]. Задачу не решили также предположения, что источником такой энергии может служить процесс сегрегации металлического ядра Земли, если он имел место не в катархее, а продолжается равномерно до современной эпохи, поскольку, как было показано выше, при преобразовании однородной модели Земли в реальную Землю с центральной конденсацией ($\rho_c = 13,543$ г/см³) выделяется энергии в два раза меньше требуемой— $0,57 \cdot 10^{28}$ эрг/год.

Удовлетворительное решение вопроса дала теория контракции [см. 10]. При анализе теплового баланса Земли, основанного на сопоставлении удельного веса отдельных членов уравнения теплопроводности, выяснилось, что т. н. конвективный член этого уравнения ($V_r \text{ grad } T$) на один порядок больше суммы остальных членов и зависит почти всецело от скорости уменьшения радиуса Земли. Этот вывод сразу следует из неравенства $2h/R \leq V_r$, если принять значение коэффициента тепловой диффузии $h = 0,012$ см²/сек, характерного для пород земной коры, и $R = 6,37 \cdot 10^8$ см. Тогда $2h/R = 3,37 \cdot 10^{-11}$ см/сек, в то время как минимальное значение скорости уменьшения радиуса Земли $V_r = 2,21$ см/100 лет = $69,8 \cdot 10^{-11}$ см/сек. Следовательно, вынос тепла из недр происходит при эффективном значении коэффициента тепловой диффузии, в 20 раз превышающем реальный коэффициент. Расчетная формула $q = MC_v V_r \partial T / \partial R$ дает при этом значении V_r и $\partial T / \partial R = 1^\circ/\text{км}$, $q = 1,6 \cdot 10^{28}$ эрг/год, что подтверждает правильность указанного предположения о роли контракции для поддержания конвективных течений. Таким образом, выясняется, что длительная контракция не-

возможна без конвективного механизма выноса тепла и, наоборот, конвекция невозможна без контракции, поскольку только последняя поддерживает необходимый перепад температур между основанием и кровлей конвективного слоя (поверхность конвективных ячеек порядка $R \times R$) [см. 10].

Как уже отмечалось, при контракции Земли происходит концентрация напряжений и деформаций в нескольких узких зонах литосферы. 800 млн. лет т. н. средняя плотность Земли составляла $4,6 \text{ г/см}^3$, а радиус — 6770 км. Сокращение больших кругов литосферы за это время составит около 2550 км, т. е. почти 6%, а уменьшение поверхности Земли 12% (такую площадь занимают альпийские цепи байкальской, каледонской, герцинской, киммерийской и новоальпийской тектонических циклов). Введя коэффициент концентрации деформации $\beta = 2\pi R / 2\pi \Delta R$, получим скорость горизонтального движения литосферы к оси зоны концентрации деформации $U = 2\pi\beta V_r$. При $V_r = 0,022 \text{ см/год}$ (минимальная скорость уменьшения радиуса Земли) и $\beta = 100\% / 6\% = 16,6$ получим $U = 2,3 \text{ см/год}$, а при $\beta = 33$ (концентрация деформаций в геосинклиналях шириною 1300 км) получим $U = 4,7 \text{ см/год}$, что сопоставимо со скоростью горизонтального перемещения литосферных плит на краях рифтовых систем [10].

Необходимо указать здесь на существование различия между деформацией плоских плит и деформацией сферондальных оболочек. В случае, когда изгиб пластины мощностью h сопровождается растяжением, последнее является эффектом второго порядка малости по сравнению с величиной самого прогиба w и начинает сказываться при $w \rightarrow h$; в случае сферондальных оболочек, наоборот, растяжение является эффектом первого порядка даже при слабом изгибе. При простом радиальном растяжении сферической оболочки радиуса R и мощности h отношение энергии деформации при растяжении к энергии деформации при изгибе равняется $(R/h)^2$; в случае Земли это отношение равняется 10^4 , что указывает на преимущественную возможность возникновения в сферических оболочках деформаций изгиба (если оболочка не имеет особенностей, способствующих развитию деформаций с растяжением). Вместе с этим в процессе развития изгибных деформаций будут возникать деформационные структуры (серповидные желоба, синеклизы и др. тектогены) по малым кругам сферической оболочки, требующие минимум энергии для своего возникновения по принципу минимума энергии (принцип наименьшего действия). Этому принципу соответствует также цилиндричность формы изгибных структур (включая синусоидальную форму искривления пластов в альпийских складчатых системах).

(4). ЗАДАЧА УСТОЙЧИВОСТИ ЛИТОСФЕРЫ

Как уже указывалось, все компактные геосинклинальные складчатые системы типа Большого Кавказа, Малого Кавказа, Карпат, Альп, Аппалачей, Анд, Эльбурса, островных дуг и др. имеют ширину порядка 200 ± 20 км. Принимая сокращение ширины этих систем вследствие

складчатости на $1/4$, получим первоначальную ширину их 250 ± 25 км. Примерно такую же ширину имеют глубоководные желоба типа Яванского, Филиппинского, Гватемальского и др. прогибов. Предполагается, что литосфера в этих местах потеряла устойчивость, образовала прогнутые структуры (тектогены) шириной 200—250 км, которые в последующем усложнялись (расчленялись на прогибы и поднятия меньшей ширины—35—40 км), заполнялись разнообразными осадочными и вулканогенными образованиями, достигающими нередко мощности 10—15 км. В развитии этих тектогенов в дальнейшем наступает переломный этап, когда нисходящие движения уступают место восходящим движениям, и на месте тектогена постепенно вырастает хребет. Складчатая структура пластов создается в основных чертах в процессе уменьшения ширины тектогена под воздействием горизонтальных сжимающих сил и далее усиливается при поднятии и выворачивании тектогена ввиду того, что первичная (виртуальная) длина пласта в прогибе (длина дуги) больше ширины прогиба (хорды) [см. 2].

Литосфера представляет собой сферическую оболочку (в первом приближении плиту), залегающую на субстрате, который в отдельных районах находится в полужидком состоянии (астеносфера) или по тем или иным причинам приобретает текучесть. По законам механики начальная (критическая) ширина прогиба литосферы, изображаемого как полуволна синусоидальной линии, определяется формулой $L_0 = \pi a = \pi (B/\rho)^{1/2}$, где B — жесткость изгиба литосферы (зависящая от ее мощности и твердости), а ρ — плотность астеносферы. Для литосферы мощностью 75 км, с коэффициентом твердости $\mu = 4 \cdot 10^{11}$ дин/см², $B = 3,2 \cdot 10^{31}$ дин/см. При $\rho = 3,48$ г/см³, $L = \pi a = 250$ км. По тем же законам доказывається, что литосфера теряет устойчивость под влиянием одного лишь собственного веса (без воздействия внешних сил), если подстилающие ее массы переходят из твердого состояния в жидкое и если ее мощность заметно превосходит величину $H_{кр} \sim R/100$ (R — радиус Земли). Здесь представляется необходимым привести важный пример из области техники [см. 4, 16].

Устойчивость телевизионной мачты зависит от жесткости изгиба B , веса Q мачты и если предположить, что на ее вершине имеется также груз P , то и от этого груза. Согласно теории Эйлера, когда давление на фундамент мачты достигает некоторого критического значения $P_e = Q + P$ мачта коробится, теряет устойчивость и рушится, причем причиной этого может быть как чрезмерно большая высота мачты $l = Q/\rho$, так и большая концевая нагрузка P . Для обеспечения устойчивости высоких радиомачт, к ним устраивают оттяжки (эту роль для системы бурильных труб в глубоких скважинах играют стенки скважины и буровой раствор).

Рассмотрим синусоидально изогнутую полосу литосферы, разорванную вдоль гребней поднятий. На вертикальную осевую плоскость прогиба (тектогена) давят своим весом оба крыла прогиба.

При длине крыла 250 км и изостатической плотности $\rho = 3,48 \text{ г/см}^3 - 3,13 \text{ г/см}^3 = 0,35 \text{ г/см}^3$ ориентированное давление на срединную продольную плоскость от одного крыла прогиба составит $P = 8700 \text{ кг/см}^2$ и поскольку предел текучести литосферы составляет максимум 2700 кг/см^2 , то в оси прогиба произойдет пластическая деформация и возникнет пластичный шарнир, начнется скольжение крыльев к оси прогиба (или в сторону, если речь идет о неограниченной протяженности моноклиальной плиты). Поскольку массам субстрата приписывается относительно высокая текучесть, то эти массы в стремлении к гидростатическому равновесию системы литосфера—астеносфера будут стремиться к разорванным гребням поднятий, образуя ядра протыкания (диапиры). Подобная схема, где литосфера под влиянием собственного веса скользит вниз, а астеносферные массы движутся ей навстречу (вероятно, при наличии газовой подушки под литосферой) представляет процесс качения (роллинга) и, как известно, требует минимума энергии, т. е. вероятность реализации роллингового механизма спрединга максимальная. Скольжение литосферных плит в сторону от гребневых зон срединноокеанических хребтов и аркообразных структур континентальной коры (дивергентный спрединг) объясняется нами указанным механизмом (поскольку в зоне рифта литосфера разорвана, то $P = P_{\text{в.р.}} = 0$ и $Q = P_e$, т. е. литосферная плита скользит по латерали под влиянием лишь собственного веса). Потеря устойчивости и скольжение литосферы по этому механизму рассматривались нами в работах 1955—1960 гг. (позднее в 1975—1976 гг. совместно с М. П. Воларовичем, А. В. Арутюняном, А. И. Левыкиным). Аналогичные представления развивались Орованом и Эльзассером в работах 1965, 1969 гг. [см. 10], В. А. Магницким и Е. А. Арутюшковым в 1978 г. [24].

(5). НЕКОТОРЫЕ СМЕЖНЫЕ ВОПРОСЫ

Важнейшим достижением геофизических исследований является вывод о концентрически-оболочечной модели внутреннепостроения Земли: (а) внутреннее твердое металлическое ядро радиусом около 1300 км; (б) над ним жидкая оболочка с внешним радиусом около 3500 км (вероятно, состоящее из железа, ферросилиция и троилита); (в) мантия, заключенная между поверхностями с радиусами 3500 и 6355 км (состоит из гранатовых и шпинеловых перидотитов и лерцолитов и продуктов их коллапса); (2) кора с усредненной мощностью 16 км. Эта модель подтверждается методами статистической физики, если предположить, что Протоземля состояла из существенно оливинового вещества состава $FeO \cdot MgO \cdot SiO_2$ с заметно большими примесями серы, кальция, алюминия, никеля, хрома и др. и подверглась расслоению в поле центральных сил. Считая кеплеровыми орбитами экватор мантии на границе раздела Мохоровичича с номером $l=1$, экватор внешнего ядра с номером $l=3$, экватор внутреннего ядра с номером $l=5$, можно убедиться, что средний репрезентативный атомный номер вещества данной сферы аппроксимируется уравнением $Z \leq 6(l+1)$; плотность ρ_s внешней оболочки данной сферы,

имеющей среднюю плотность ρ_c , определяется формулой $\rho_s = \rho_c (2l + 1)/(2l + 2)$, репрезентативный атомный номер оболочки — уравнением $Z = 3(2l + 1)$, радиус орбиты — формулой $R_l = R/\sqrt[3]{l}$, средняя плотность данной сферы $\rho_l/\rho_m = Z_l/Z_m$, объем сферы $V_l = V_0/l$. Эти формулы дают, в частности для центрального ядра $Z \leq 36$, для ядра в целом $Z = 24$ (вероятный средний состав $Fe_7 Ni S Si$), для Земли (без коры) $Z = 12$ (вероятный состав $Fe Mg SiO_4$), для внешнего ядра $Z = 21$ (FeS), внешней мантии $Z = 9$, среднюю плотность ядра в целом $\rho = 2\rho_m$ (ρ_m — средняя плотность Земли без коры), плотность мантии $(3/4)\rho_m$, плотность коры ($l = 0$), $\rho = (1/2)\rho_m$, массу ядра в целом $1/3 M$ (M — масса Земли), массу внутреннего ядра $\left(\frac{1}{60} + \frac{1}{40}\right) \cdot M$

(во всех этих формулах в статистическом смысле средневзвешенный атомный номер вещества принимается равным удвоенному значению его атомного номера, а малые примеси других элементов элиминируются).

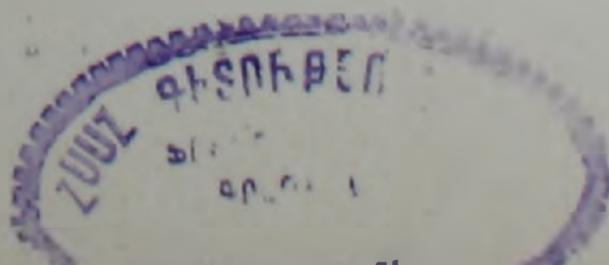
Остается совершенно неясным вопрос о том, расслоение произошло в стадии протопланетной туманности или в геологическое время. Этот вопрос имеет важное значение для решения некоторых геоэнергетических задач.

Энергия гравитационного поля однородной модели Земли $W_0 = -3GM^2/5R$, энергия неоднородной модели с центральной конденсацией $W_1 = -3GM^2/(5-n)R$ (G — гравитационная постоянная, M — масса, R — средний радиус, n — показатель конденсации: он равен нулю для однородной модели, равен 3 для модели, масса которой сосредоточена в центре тела, равен 3/5 для реальной Земли — точнее он равен 0,5854 — судя по отклонениям реальных орбит спутников Земли от круговой орбиты, характеризующей однородную модель Земли). Значение их суть: $W_0 = -2,25 \cdot 10^{39}$ эрг, $W_1 = 2,53 \cdot 10^{39}$ эрг, $W_1 - W_0 = -0,28 \cdot 10^{39}$ эрг.

Согласно формуле $\Delta U = MC_v \Delta T$ (M — масса, C_v — удельная теплоемкость Земли, равная $1,25 \cdot 10^7$ эрг/г. град) этой энергии достаточно для повышения средней температуры Земли минимум на $\Delta T = 800^\circ$ [10, 25, 30].

При уменьшении объема Земли или гравитационной дифференциации вещества, часть энергии W переходит в кинетическую (почти полностью в тепловую) энергию U согласно уравнению $U = (2\pi/Q) W$, $\Delta U = (2\pi/Q) \cdot \Delta W$, в котором Q т. н. диссипативный фактор, определяющий долю потенциальной энергии, переходящей в тепловую энергию (в зависимости от свойств вещества, термобарических условий, кинематики движений и т. д.). Согласно данным анализа чандлеровских колебаний полюса $Q = 10\pi + 12\pi$.

В этом случае при переходе от однородной модели Земли к реальной получается $\Delta U = (2\pi/11\pi) \Delta W = 0,28 \cdot 10^{39}/11\pi = 2,54 \cdot 10^{37}$ эрг. Если разделить эту энергию на время $4,5 \cdot 10^9$ лет, получим $5,66 \cdot 10^{27}$ эрг/год.



При уменьшении радиуса Земли со скоростью $V_r = 2,21 \text{ см}/100 \text{ лет}$ и $Q = 11\pi$ получим $q = (2\pi/11\pi) W V_r = 1,16 \cdot 10^{26} \text{ эрг/год}$. Тепловые потери Земли по Девису [40] оцениваются величиной $1,17 \div 1,42 \cdot 10^{28} \text{ эрг/год}$, причем по оценке О. Г. Сорохтина на долю радиогенного тепла приходится $0,36 \cdot 10^{28} \text{ эрг/год}$ [см. 32].

Аналогичными расчетами можно показать, что равновесные значения температуры в центре Земли составляют 7200°C , в среднем для Земли 3400°C ; далее можно также показать, что при уменьшении эллиптичности Земли от $1/15$ до $1/300$ средняя температура увеличивается на 500°C , при переходе однородной модели Земли в реальную на 800°C (при значении $Q = 11\pi$).

Следует отметить, что теория контракции решает также две проблемы: проблему чандлеровских колебаний полюсов и проблему магнитного поля Земли [см. 5, 8].

Земля представляет собой гигантский магнитный диполь, ось которого образует с осью вращения угол $D = 11^\circ 47'$. Момент его $Q_\mu = 8,13 \cdot 10^{25} \text{ СГС}$.

Атомы и электроны в Земле представляют собой элементарные магнитные диполи (магнитные стрелки), которые, ориентируясь в энергетически выгодном для себя направлении, образуют в совокупности единый крупный диполь. Момент его $Q_\mu = H \bar{R}^3 = 0,5 H_p R^3$ (H — напряженность магнитного поля однородно намагниченного шара радиуса R , H_p — напряженность поля на полюсах, равная $0,63 - 0,65 \text{ гс}$) соответствует близширотному току в металлическом ядре Земли (радиус около 3500 км) силы $5,3 \cdot 10^9 \text{ ампер}$. Для поляризации указанных микродиполей совершается работа, эквивалентная энергии поля $U_\mu = M H^2 / 8\pi r$, которая соответствует магнитному вращательному моменту $\vec{D} = \vec{Q} \times \vec{H}$. Такая ориентация диполя с моментом \vec{Q}_μ обеспечивается магнитным полем напряженности \vec{H}_p , силовые линии которого лежат примерно в плоскости меридианов и соответствуют магнитному полю близширотных круговых электрических токов.

Представим две совмещенные модели Земли — одну эвклидовую недеформируемую и вторую гауссовую, деформируемую и далее допустим, что вся система силовых линий магнитного поля жестко вмонтирована в эвклидовую модель, а гауссова модель медленно прецессирует вокруг нее.

Ось вращения и ось инерции (ось фигуры) Земли не совпадают — они образуют угол, достигающий величины $\beta = 0,3''$, а ось вращения прецессирует вокруг оси инерции как волчок. Теория Эйлера на основе уравнения $(\omega - f\Omega)(\omega + \Omega) = 0$ предсказывает два типа прецессии (нута́ции): в одном случае прецессия совершается против хода суточного вращения Земли ($\Omega = f\omega$), с периодом 434 дня, а в другом — по ходу вращения ($\Omega = -\omega$), притом со скоростью, практически равной скорости вращения Земли. Это т. н. квазисуточная или резонансная нута́ция (с периодом около 24 ч), которая, как полагали в прошлом, отчетливого кинематического выражения не имеет. Полная энергия

квазисуточной прецессии $E_q = \frac{1}{2} kMR^2 \omega^2 \sin^2 \beta$, а энергия магнитного поля Земли $E_n = H^2 M / 8\pi r$. Если в кинематическом выражении причиной практического отсутствия квазисуточной нутации считать наличие магнитного поля, т. е. если считать, что электромагнитный вращательный момент Земли уравнивается противоположно направленным моментом квазисуточной нутации (прецессии) и положить соответственно $E_q = E_n$, то получим

$$H = \beta \omega R \sqrt{4\pi k r} = 0,315 \text{ гс}, \quad H_p = 2H = 0,63 \text{ гс}.$$

Величина $\beta \omega R = \Delta V$ и $\beta \omega = \Delta \omega$ представляет линейную и угловую скорость дифференциально вращающейся гауссовой модели в отношении эвклидовой модели; значения $\beta V = 0,072 \text{ см/сек}$, $\Delta \omega = 1,13 \times 10^{-10} \text{ рад/сек}$, а также H, H_p хорошо согласуются с наблюдательными данными, указывающими на дрейф магнитного поля в лабораторной системе отсчета на запад со скоростью $0,2^\circ$ за год ($\Delta \omega = 10^{-10} \text{ рад/сек}$, $\beta V = 0,08 \text{ см/сек}$).

Дифференциальное вращение Земли прецессионного типа, фиксируемое в лабораторной системе отсчета, при высокой электрической проводимости масс в земном ядре и существовании дипольного магнитного поля предписывает Земле работу по *схеме магнитно-гидродинамической машины* (в модели прецессионного движения запрет Каулинга отсутствует). Равным образом, согласно теории относительности в проводящем ядре происходит разделение электрических зарядов (накопление свободных электронов на поверхности ядра) и в лабораторной системе отсчета, вращающейся в отношении зарядов с угловой скоростью $\beta \omega = \Delta \omega$ в толще намагниченной Земли появляется электрический пиротермический момент; в этом случае Земля работает в *схеме униполярной динамомашины*: ротором является ядро, а статором (квазистатором) — мантия; электрические токи, взаимодействуя по закону индукции с магнитным полем, усиливают его, причем во втором случае учитывается возможность преобразования тороидальных магнитных полей в полондальные. *Эти обе схемы по существу тождественны* (магнитно-гидродинамическая динамомашинка была создана на основе униполярной динамомашинки). В рассматриваемой задаче эти машины совершают работу за счет той части энергии гравитационного поля, которая используется для резонансной квазисуточной прецессии и диссипирует в виде джоулева тепла.

В порядке постановки вопроса отметим следующее.

В квантовой физике в атоме выделяются квантованные оболочки, которые обычно нумеруются рядом $l=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Магнитная ось (спин) электрона, находящегося на уровне l_n , может располагаться в $2l+1$ различных направлениях. В толще Земли выделяются три оболочки (сферы) первого порядка $l=1$ (поверхность мантии), $l=3$ (поверхность внешнего ядра), $l=5$ (поверхность внутреннего ядра). Если считать, например, что магнитный момент планеты связан с ее твердым внутренним металлическим ядром, который охватывается поверхностью

$l=5$ или всем ядром, охватываемым поверхностью $l=3$, то в первом случае ось геомагнитного диполя могла занимать в течение всей своей истории в различные ее эпохи одно из 11 возможных направлений, а во втором случае одно из 7 возможных направлений. Одним из вариантов такого скачкообразного изменения направления поля следует считать инверсию магнитной оси Земли, которая совершалась за последние отрезки геологической истории, примерно через каждые 2 млн. лет. Если такая аналогия окажется в действительности правомерной, то изменится традиционная аргументация о дрейфе литосферных плит, основанная на данных палеомагнетизма.

Касаясь проблемы свободных нутационных колебаний оси Земли, следует указать, что из многочисленных гипотез, предложенных для объяснения возбуждения колебаний полюса (периодическое, через каждые 13 лет, сближение и расхождение полюса инерции и полюса вращения с амплитудой колебания $\Delta\beta = 0,14'' = 4,5$ м), удовлетворительной оказалась гипотеза контракции. Полагая угловой момент Земли постоянным, получаем пропорцию $\Delta J/J = \Delta\omega/\omega$ в свою очередь $\Delta J/J = f\Delta\beta$ (ΔJ , $\Delta\omega$, $\Delta\beta$ — малые изменения момента инерции, угловой скорости вращения, нутационного угла β , f — динамическое сжатие Земли). При значениях $J = 8,1 \cdot 10^{41}$ г.см², $f = 1/305,51$, $\omega = 7,29 \cdot 10^{-5}$ рад/сек, $\Delta\beta = 7,07 \cdot 10^{-7}$ рад получаем $\Delta J/J = 2,31 \cdot 10^{-9}$ за 13 лет, что вполне удовлетворительно согласуется с оценками, полученными другими способами (при этом значении $\Delta J/J$ из выражения $\Delta J = MR_i^2 \cdot 2\Delta R/R_i$ получаем скорость уменьшения радиуса инерции Земли $R_i = R\sqrt{0,33}$, на 0,735 см за 13 лет, а скорость уменьшения истинного радиуса $\Delta R \leq 0,43$ см за 13 лет или 3,3 см за 100 лет). Колебания полюса обуславливаются в указанной схеме периодическим усилением и ослаблением напряженного состояния толщи Земли, обусловленного контракционно-релаксационным механизмом.

В связи с выделяемыми двумя типами нутации возникает вопрос о применении критерия Мунка и Ревеля о турбулентности материков $m_1/m_3 = \sqrt{3}/Qf$, связывающей нутационные колебания полюса (m_1), колебания продолжительности суток (m_3) и динамическое сжатие Земли f . Известное значение $f = 1/305,5$ в данной задаче характеризует абсолютно твердую модель Земли и должно быть заменено отношением $f' = 2/\omega$, равным в общем случае отношению частоты нутации Q к частоте суточного вращения Земли ω . В этом случае

$$\frac{m_1}{m_3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\omega}{Q}$$

Для резонансной (квазисуточной, потенциальной) нутации $Q/\omega = 1$, $m_1 \simeq m_3$ и процессы, которые должны вызывать колебания полюсов и изменения скорости вращения Земли, обладают очень высокой симметрией. Для реальных чандлеровских колебаний $|\omega/Q| = 434$, $m_1 = 375 m_3$. Следовательно, указанные процессы в действительности хаотичны и взаимные перемещения литосферных блоков носят „турбулентный“

характер (согласно наблюдательным данным смещения полюса $m_1 = \Delta\theta = 7,07 \cdot 10^{-7}$ рад, а вариация вращения $m_3 = 5,31 \cdot 10^{-9}$).

Заключение

Попытки осмыслить важнейшие геологические события и их последствия восходят к эпохе Возрождения, а в отдельных случаях—к древним грекам. Наиболее плодотворные и научно-обоснованные представления были разработаны за последние 350 лет после появления космогонических идей Декарта, Ньютона и Канта (особенно за последние 200 лет), после появления классических геодинамических разработок Клеро, Роша, Кельвина, Дж. Дарвина, Джеффриса, Слудского, Лява, Пуанкаре, Лейбензона, Молоденского, важнейших геотектонических идей Эли де Бомона, Зюсса, Гейма, Холла, Шатского (гипотеза контракции), Даттона (принцип изостазии), Тейлора и Вегенера (гипотеза дрейфа континентов), Ога и Павлова (контракционно-изостатическая теория), Холмса и Гутенберга (гипотеза конвективных течений), Линдемана-Хильгенберга (гипотеза экспансии), Бухера, Обручева, Кропоткина (пульсационная гипотеза), Джоли, Холмса и Белоусова (гипотеза радиоактивных циклов); Хобса, Джеффриса, Пейве (идея глубинных разломов); Карпинского, Белоусова, Магницкого (идея вертикальных колебательных движений) и др. В новое время плеядой геологов и геофизиков разрабатывается т. н. новая глобальная тектоника или тектоника плит, представляющая развитие основной идеи мобилизма о разбегании литосферных плит и разрастании океанического дна [14, 17, 19, 20, 21, 26, 30, 32, 42, 43].

Создание единой теории геологических процессов остается одной из важнейших задач всего естествознания. Современная геология является хотя и полуколичественной наукой, но однозначно решает многие поставленные перед ней сложные системные вопросы. Вместе с этим в наше время геология стала основой прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых. Достижения ее в открытии закономерностей проявления геодинамических процессов, распространении, локализации и выявлении промышленных залежей полезных ископаемых, прогнозировании ряда стихийных явлений идут в ногу со многими выдающимися достижениями в области атомной физики, вычислительной техники, молекулярной биологии, космонавтики, материаловедения и др.

Выше мы пытались показать главенствующую роль механизма гравитационного сжатия в управлении геодинамическими процессами и отметили, что возражения, которые были высказаны против теории сжатия (контракции), не относятся к существу идеи, а, как выясняется, направлены против решений отдельных некорректно поставленных частных задач контракции.

Ряд вопросов остается нерешенным и в случае признания теории контракции. Самый трудный из них—вопрос крупных горизонтальных перемещений литосферных блоков (в смысле мультиспредиинга), однако привлечение механизма конвективных движений, действующего за счет

энергии гравитационного поля, решает этот вопрос с той же точностью, что и механизмы, связываемые с распределенными радиогенными источниками. Преимущество теории контракции по сравнению с другими концепциями заключается в ее безупречности в смысле соответствия ее законам механики [18, 35, 37], точности индикации источников энергии тектонического процесса, периодичности самих тектонических процессов, становления магнитного поля, колебаний полюсов и др., и, наконец, в ее больших возможностях комплексироваться со многими естественными науками и со всеми теми геологическими представлениями, которые решают те или иные отраслевые проблемы (вулканизм, плутонизм, осадконакопление, рудообразование, трансгрессии и регрессии и др.).

Институт геологических наук
АН Армянской ССР

Поступила 28. III. 1983.

Ա. Տ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ

ԵՐԿՐԱԴՆԵՒԻ ՆԵՐՔԻՆ ԾԱՎԱԼԻ ԵՎ ԲԵՎԵՌԱՅԻՆ ՍԵՂՄՄԱՆ ԽՈՇՈՐ
ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ ՆՐԱՆՑ ՏԵԿՏՈՆԱԿԱՆ
ՀԵՏԵՎԱՆՔՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Հողվածում ցույց է տրված գեոդինամիկ պատկերացումների մի ինքնահամաձայնեցված, ինքնամփոփ համակարգ, որ հիմնված է հետևյալ նախադրրյալների վրա. մոտ $4,5 \cdot 10^9$ տարի առաջ Երկրագնդի պտտման պարբերությունը կազմում էր մոտ 6 ժամ, շառավիղը՝ $R = 7390$ կմ, միջին խտությունը՝ $3,543$ գ/սմ³, մինչև Լուսին ունեցած հեռավորությունը՝ $70-80$ հազար կմ, բևեռային սեղմումը՝ $1/15$, հասարակածային շառավիղը՝ 7550 կմ, միջին հաշվով շառավիղի փոքրացման նվազագույն արագությունը՝ $v_r = (7390 - 6370)$ կմ/ $4,5 \times 10^9$ տարի $= 2,27$ սմ/100 տարի:

Երկրագնդի մեծ շրջանների փոքրացումը մարսյան խտությունից ($R = 2200$ կմ, $\rho = 3,89$ գ/սմ³) դեպի այժմեականին անցնելիս՝ առաջին գրանիտոիդների (էնդերբիտների) առաջացման ժամանակաշրջանից ($3,8 \times 10^9$ տարի առաջ) հետո, կազմում է $\Delta C = 5260$ կմ, իսկ Երկրագնդի մակերևույթի նվազումը՝ 26% : Մեծ շրջանների այդպիսի փոքրացումը իրականանում է գեոսինկլինալային ճկվածքների, կամարածե բարձրացումների, լիթոսֆերային սալերի սուբգուկցիայի և այլոց առաջացմամբ: Բևեռային սեղմման փոքրացումն իր հերթին հանգեցնում է երկրակեղևի և թիկնոցի շրջանների սեղմմանը 45° ավելի փոքր լայնությունների վրա: Էլիպտիկության այդպիսի փոփոխությունը, հավանաբար, կարող էր համաշխարհային ուֆոտային համակարգի մատրիցան կազմող հզոր, մեծ խորություններ թափանցող բեկվածքների առաջացման սլատճառ հանդիսանալ:

Որոշակի տեկտոնական էֆեկտների առաջացում է ենթադրվում նաև մեր մոլորակի արտաքին ձևի վերափոխման հետևանքով՝ կապված զանգվածների իներցիայի մոմենտի փոփոխությունների հետ, որոնք հետևանք են լիթոսֆերային բլոկների զգալիորեն մեծ և համեմատաբար արագ ընթացող ուղղաձիգ

տեղաշարժերի, վերադիր հրաբխային և սառցադաշտային գանգվածների առաջացման հետևանքով և այլն:

Նշվում է լարվածությունների և դեֆորմացիաների կուտակման փաստը լիթոսֆերայի որոշ նեղ գոտիներում (գեոսինկլինալներ և այլն) և որպես հետևանք՝ լիթոսֆերային սալերի խոշոր հորիզոնական տեղաշարժերի անխուսափելիությունը $v_0 = 2\pi\beta v$, սրագոյությունը, որը հասնում է 4—5 սմ/տարի մեծության, երբ կուտակման գործակիցը՝ $\beta = 15—20$ և $v_r = 0,03$ սմ/տարի ընդգծվում է այն միաբեր, որ թիկնոցում կոնվեկցիան օժանդակություն է ստանում կոնտրակցիայից (ձգողական դաշտի էներգիայից), իսկ ինքը՝ կոնտրակցիան հնարավոր է ընդերքից ջերմության հեռացման կոնվեկտիվ մեխանիզմի շնորհիվ միայն: Նշվում է նաև կոնտրակցիայի պրոցեսի ընդհատ բնույթը, որը դիպլոմատարար իր տեղն է դիջում էքսպանսիային՝ ջերմության հեռացման դանդաղման և սոդիաբատիկ երևույթների դարգացման հետևանքով:

A. T. ASLANIAN

GREAT CHANGES OF EARTH'S INNER VOLUME AND POLAR COMPRESSION AND THEIR TECTONIC COSEQUENCES

Abstract

A self-concorded excluded system of geodynamical ideas is brought based on the following premises; $4,5 \cdot 10^9$ years ago the Earth's rotation period was about 6 hours, radius $R = 7390$ km, average density— $3,543$ g/cm³, distance to the Moon— $70—80.000$ km, polar compression (ellipticity)— $1/15$, equatorial radius— 7550 km, the minimal velocity of radius average reduction $v_r = (7390—6370)$ km/ $4,5 \cdot 10^9$ year = $2,27$ cm per 100 years.

The Earth's great circles decrease during transition from Marsian density ($R = 7200$ km, $\rho = 3,89$ g/cm³) to the contemporary one in an interval of time beginning from the first granitoids (enderbites) formation $3,8 \cdot 10^9$ years ago makes $\Delta C = 5260$ km and Earth's surface reduction makes 25%. Such a decrease of great circles is realized by formation of geosynclinal troughs, arch-like uplifts, subduction of lithosphere plates e. t. c. Decrease of polar flattening in its turn brings to the crust and mantle circles compression in latitudes less than 45° . Such a change of ellipticity could be at a bottom of powerful, deep penetrating main fractures network forming, which constitute the matrix of planetar rift system.

Certain tectonic effects are also considered as a result of Earth's figure re-forming in connection with the masses moment of inertia changes connected with noticeably great and comparatively fast vertical displacements of lithosphere plates, formation on volcanic and glacial masses e. t. c. The significance of stress and deformation concentrations is marked out in some narrow lithosphere zones (geosynclines e. t. c.) and, as a result, the inevitability of great horizontal displacements of lithosphere plates at a speed of $v_0 = 2\pi\beta v$, which makes 4—5 cm/year at

the concentration coefficient $\beta = 15-20$ and $v_r = 0,03$ cm/year. The conclusion is underlined that convection in mantle is supported by contraction (energy of gravitational field), and in its turn contraction is possible only when convective mechanism of heat removing from entrails is present. The interrupted character of contraction process is also noted, which episodically yield to expansion process in view of heat removing delay and adiabatic processes development.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Амбарцумян В. А. (ред.)—Проблемы современной космологии. «Наука», М., 1972.
2. Асланян А. Т. Динамическая проблема геотектоники. Доклады советских геологов на XXI МГК, Изд. АН СССР, М., 1960.
3. Асланян А. Т. Предельные значения мощности и прочности литосферы в свете теории гравитационного сжатия и приливного торможения Земли. Изв. АН Арм.ССР, Науки о Земле, № 1, 1976.
4. Асланян А. Т., Арутюнян А. В., Волярович М. П., Левыкин А. И. Об одном возможном механизме становления гипербазитовых поясов и спрединговых структур. Изв. АН Арм.ССР, Науки о Земле, № 5, 1976.
5. Асланян А. Т. Возбуждение чандлеровских колебаний полюса как проявление контракции Земли. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, № 4—5, 1977.
6. Асланян А. Т. К расчету скорости векового изменения радиуса Земли. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, № 5, 1978.
7. Асланян А. Т. Термогравитационный критерий изменения объема Земли. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, № 3, 1978.
8. Асланян А. Т. Квазисуточная нутация и магнитное поле Земли. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, № 4, 1978.
9. Асланян А. Т. К динамике системы Земля-Луна. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, № 1, 1979.
10. Асланян А. Т. Конвекция и контракция. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, т. XXXV, № 6, 1982.
11. Бербидж Дж., Бербидж Э. Т. Звездная эволюция. В сб. «Происхождение и эволюция звезд», ИЛ, М., 1962.
12. Белоусов В. В. (ред.) Тектоносфера Земли. «Наука», М., 1978.
13. Васильковский Н. П., Каттерфельд Г. Н., Лапо М. С. Гравитационное сжатие и тектогенез. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, т. XXXV, № 2, 1982.
14. Венинг-Мейнес Ф. А. Тепловая конвекция в земной мантии. Сб. «Дрейф континентов», Мир, М., 1966.
15. Грачев А. Ф. Рифтовые зоны Земли. «Недра», Л., 1982.
16. Динник А. Н. Продольный изгиб и кручение. Изд. АН СССР, М., 1955.
17. Джекобс Дж. А., Россел Р. А., Уилсон Дж. Физика и геология. «Мир», М., 1964.
18. Джеффрис Г. Земля, ИЛ, М., 1960.
19. Жарков В. Н., Трубицын В. П. Физика планетных недр. «Наука», 1980.
20. Зоненшайн Л. П., Савостин Л. А. Введение в геодинамику. «Недра», М., 1979.
21. Кеонджян В. П. Модель плотностной конвекции в мантии Земли. Известия АН СССР, Физика Земли, № 8, 1980.
22. Кропоткин П. Н. Новая геодиническая модель. ДАН СССР, 1983.
23. Люстих Е. Н. Некоторые замечания об использовании физики в геотектонических построениях. Известия АН СССР, сер. геол., № 1, 1962.
24. Магницкий В. А., Артюшков Е. А. Некоторые общие вопросы динамики Земли. Сб. «Тектоносфера Земли», Наука, М., 1978.
25. Макдональд Г. Дж. Ф. Приливное трение. В сб. «Приливы и резонансы в солнечной системе», Мир, М., 1975.

- Слан-
26. Новая глобальная тектоника. Сб. статей, переводы с англ. яз. под ред. Л. П. Зонс-
шайна и А. А. Ковалева, Мир, М., 1974.
 27. Пейве А. В. (ред.) Тектоника в исследованиях Геологического института АН СССР.
«Наука», М., 1980.
 28. Полдерварт А. (ред.) Земная кора (сборник статей). ИЛ, М., 1957.
 29. Пущаровский Ю. М. Проблемы тектоники океанов. Сб. «Тектоника в исследованиях
Геологического ин-та АН СССР», «Наука» М., 1980.
 30. Ранкорн С. К. (ред.). Дрейф континентов. Сборник статей, «Мир», М., 1966.
 31. Рингвуд А. Е. Состав и петрология мантии Земли. «Недра», М., 1981.
 32. Сорохтин О. Г. (ред.). Геофизика океана, т. 2, Геодинамика, «Наука», М., 1979.
 33. Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л., Вархафтак К., Файф У., Земля, т. II, «Мир», М.,
1974.
 34. Хаин В. Е. Общая геотектоника. «Недра», М., 1964.
 35. Шейдеггер А. Е. Физические аспекты природных катастроф. «Недра», 1981.
 36. Яншин А. Л. Развитие геологии и ее современные особенности. Сб. «Методологи-
ческие и философские проблемы геологии», «Наука», Новосибирск, 1979.
 37. Birch F. On the possibility of large changes in the Earth's volume. *Physics of the
Earth and Planetary Interiors*, 1, 141, 1968.
 38. Brosche P., Sundernam J. (red.) Tidal friction and the Earth's rotation. Springer
Verlag, 1978.
 39. Brunn V. von. Hobday D. K. Early Precambrian tidal sedimentation in the Pon-
gola supergroup of south Africa. *Jour. Sedim. Petrol.*, v. 46, № 3, 1976.
 40. Davies G. F. Thermal histories of convective Earth models and constraints on ra-
diogenic heat production in the Earth. *Journ. Geophys. Res.*, v. 35, № 135, 1980.
 41. McElhinny M. W., Taylor S. K., Stevenson D. I. Limits to the expansion of
Earth, Moon, Mars and Mercury and to changes in the gravitational constant.
Nature, v. 271, 5643, 1978.
 42. Runcorn S. K. Mechanism of plate tectonics: mantle convection currents, plums
gravity sliding of expansion? *Tectonophysics*, 1980, № 1—4, 297—307.
 43. Uyeda S. Subduction zones: an introduction to comparative subductology. *Tecto-
nophysics*, 81, 1982.