

УДК 551.2

А. Т. АСЛАНЯН

СЖИМАЮЩАЯСЯ ЗЕМЛЯ КАК ФИЛЬТР-ПРЕССИНГОВЫЙ МЕХАНИЗМ ДЛЯ ЭКСТРУЗИИ ГИПОМАГМАТИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

В современных представлениях о природе вулканической деятельности не получили пока количественно обоснованного объяснения процесс подъема из мантии плотных ($\rho = 2,9—3,3 \text{ г/см}^3$) магм габбро-перидотитового состава, образующих самостоятельно или в ассоциации с основными лавами ($\rho = 2,7—2,8 \text{ г/см}^3$) громадные пояса в геосинклинальных системах, срединноокеанических хребтах и изредка в платформенных областях, и процесс крупномасштабных пластовых (силловых) инъекций, которые занимают площади в десятки тысяч кв. км и могли быть внедрены в верхнюю кору по механизму гидравлического разрыва (латерального распора) стратифицированных свит по поверхностям напластования. Равным образом, количественно недостаточно оценены энергетические возможности тех основных процессов, которые обуславливают подъем магмы из мантии к дневной поверхности.

В последующем изложении подъем магматических расплавов и практически несжимаемых текучих гипомагматических масс в целом, размещенных в толще более твердых и вязких масс мантии Земли (в виде прослоев, линз, гнезд, жил, интерстиционных капель и т. д.), рассматривается в основном как следствие общего гравитационного сжатия Земли, обуславливающего выдавливание («процеживание») их по механизму фильтр-прессинга (как в латеральном, так и в радиальном направлениях) и перемещение в зоны разрывных нарушений. Что касается других хорошо известных процессов подъема магмы на поверхность (механизм газлифта, днапировый механизм, связанный с явлениями серпентинизации и дэзклогитизации, механизм вязкостной итерации и гравитационного всплывания легких выплавов под влиянием архимедовой силы и др.), то они рассматриваются нами как процессы, накладывающиеся на основной процесс гравитационного фильтр-прессинга, особенно процесс адиабатического газлифта, который проявлен очень широко, но эффективно действует лишь до глубин в несколько км, и процесс внедрения магматических масс в раздвиги прогибающейся литосферы [1, 3, 5, 6, 12, 14, 15, 17].

Таким образом, постановка задачи в смысле функционирования фильтр-прессингового механизма требует сжатия Земли, нарушения сплошности литосферы и наличия достаточного количества энергии, обеспечивающего подъем магматических расплавов¹.

¹ Фильтр-прессинговый механизм вулканической активности сжимающейся Земли напоминает синдром гипертонического криза с кровоизлиянием, когда система крове-

Рассмотрим вкратце эти три аспекта задачи.

I. Согласно теореме вирнала Земля будет сжиматься [2] при условии

$$U < \frac{|W|}{3\gamma - 3} = \frac{3}{5 - n} \cdot \frac{GM^2}{R} \cdot \frac{1}{3\gamma - 3},$$

где $U = MTC$ — полный запас кинетической (тепловой) энергии Земли, G — гравитационная постоянная, M — масса, n — индекс полнотропии, γ — постоянная Грюнрайзена, R — радиус, T — средняя температура, C — удельная теплоемкость вещества, W — потенциальная энергия гравитационного поля Земли.

Наименее благоприятными условиями для спонтанного сжатия Земли являются $n=0$ (однородная модель планеты) и $\gamma=3$ (модель из сильно сжатого газа). При этих данных контракция будет иметь место при условии

$$T < -\frac{GM}{10 RC}.$$

Подставляя $GM/R = V_0^2 = 6,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^2/\text{сек}^2$ и $C = 10^7 \text{ эрг}/(\text{град. г.})$, получаем $T < 6350^\circ\text{К}$ (V_0 — первая космическая скорость).

Из этих оценок следует, что Земля будет сжиматься, если ее средняя температура не более 6350°К — независимо от структурных и физических особенностей, противодействующих процессу самогравитации. Поскольку температура порядка 5000 — 10000°К достигается лишь в центре Земли [8], температура 1600 — 1700°К — на глубинах 80 — 100 км (глубина очагов ряда действующих вулканов [5]), а средняя температура Земли по разным оценкам колеблется лишь в пределах 3000 — 4000° (на границе мантия—ядро 4200°К), постольку контракция Земли представляется неотвратимой¹.

II. Второе важное условие для экзотрузий абиссальных расплавов — это наличие глубоких нарушений в сплошности коры и мантии, необходимых для транспорта и реаккумуляции магмы.

Судя по распределению очагов землетрясений, заметно большей прочностью Земля обладает до глубины 700 — 800 км (исключая астеносферный слой), причем тот факт, что как очаги умеренных глубин, так и очаги больших глубин тяготеют к одним и тем же сейсмогенным поясам, дает возможность рассматривать причину возникновения и тех и других с единой точки зрения.

Согласно астрономической статистике, к концу процесса индивидуализации планет ($4,6 \cdot 10^9 \text{ лет т. н.}$), период их осевого вращения рав-

носных сосудов организма испытывает спазматическое сжатие, а сама кровь, как несжимаемая жидкость, ищет выхода из сжимающейся сосудистой системы и прорывается через пораженные участки сосудов.

¹ Для Луны при $C = 1,2 \cdot 10^7 \text{ эрг}/(\text{град. г.})$, $\gamma = 1,5$, $n = 0$ формула для U дает $T = 1300^\circ\text{К}$. Радиоактивность Луны в три раза превышает радиоактивность Земли, если считать, что тепловое излучение обоих тел обусловлено радиоактивным распадом.

нялся периоду вращения Юпитера, т. е. около 10 ч [4]. Палеоэкологическими исследованиями также доказано, что, например, в силуре (около 400 млн. лет т. н.) период вращения Земли составлял 21 ч, в среднем девоне (350 млн. лет т. н.)—21,9 ч [20].

Согласно пропорции

$$\frac{\sigma_0}{\alpha_n} = \frac{T_0}{T_n^2}$$

полярное сжатие α_n Земли, равное в настоящее время примерно 1/300, в начале геологического времени (α_0) должно было равняться примерно 1/50.

Поскольку прочность литосферы достигает $\sigma_s = 3700 \text{ кг/см}^2$ (прочность базальтов под всесторонним давлением 10.000 кг/см^2 и температуре 500°C), модуль упругости $E = 1.100.000 \text{ кг/см}^2$, а внутреннее напряжение, обусловленное полярным сжатием, имеет величину $\sigma = \alpha E = 0,5 \rho R$ (ρ —плотность, R —радиус литосферы), равную в настоящее время пределу прочности литосферы, постольку следует полагать, что в архес литосфера была расчленена разломами на множество блоков. Вместе с этим в процессе лунно-солнечного приливного торможения, соответствующего замедления вращения Земли и вытягивания ее фигуры в направлении оси вращения, образовалась сеть линейментов, которая, по-видимому, контролирует главнейшие орогенные пояса, срединноокеанические хребты, сводово-рифтовые зоны континентов, кольцевые разрывные структуры высоких широт и др. Кроме того, неизбежны нарушения сплошности коры и мантии вследствие гравитационного сжатия планеты, значительного изменения положения толщи планеты в отношении кинетической оси и соответствующей переформировки фигуры равновесия, а в последующем также изостатические движения по зонам разломов и пластических шарниров (орогенез), обеспечивающих подвижность масс для восстановления равновесия литосферы по закону Архимеда [1, 2, 7, 8, 13].

Исходя из этой предпосылки, еще в 1939 г. Г. Джеффрис [19] указал на необходимость существования в мантии Земли мощных разломов, контролирующих очаги землетрясений до глубин 700—800 км. Следуя Девисону и Дарвину, Джеффрис [8] и позднее Шейдеггер [21] и Вильсон [7] пришли к выводу, что геометрический эффект уменьшения объема Земли выражается в основном в усадке и горизонтальном растяжении верхней мантии и возникновении в ней системы контракционных раздвигов, перерастающих далее в магистральные зоны дугообразных сбросовых нарушений. Указанные зоны раздвигов (потенциальные вакуумы по А. Ритману [16]), как коллекторы—галереи должны дренировать рассеянные в смежных эклогит-перидотитовых толщах капельно-жидкие выплавки магмы, образуя жилеобразные скопления. При этом представляется вероятным, что частичное плавление масс в этих толщах должно происходить вследствие быстрого падения давления в зонах раздвигов.

В одной из ранних работ автора было высказано предположение о зарождении эвгеосинклиналией над подобными зонами контракционных раздвигов мантии, насыщенными маловязкими выплавками и обладающими по этой причине значительной деформируемостью (в смысле среды Винклера).

III. Энергетика механизма экстррузии гипоматмы, обрисованного выше, вполне увязывается с энергетикой контракции Земли.

По подсчетам Менарда, за последние 100 млн. лет в области Тихого океана, площадью около 180 млн. км², излилось около 24 млн. км³ базальтовых лав [10, 22]. Если считать это отношение нормой и экстраполировать его на весь земной шар, то выход магмы из недр составит в среднем 0,7 км³/год. Другая оценка, экстремальная, основана на предположении, что вся земная кора (выше границы раздела М) с массой $m = 2,38 \cdot 10^{25}$ г образовалась за последние $4,6 \cdot 10^9$ лет и что соответственно в течение всей истории литосферы из недр поднималось ежегодно в среднем 2 км³ твердых масс [5, 11].

Для подъема такой массы из глубины $h = 150$ км, согласно формуле $w = mgh$ требуется $3,2 \cdot 10^{35}$ эрг (g — гравитационное ускорение в интервале глубин $z = h = 150$ км), а для перевода ее в расплавленное состояние, согласно зависимости $w_m = m(tC_p + q)$, $w_m = 3,98 \cdot 10^{35}$ эрг (при температуре плавления коры 1400°К, удельной теплоемкости $C_p = 1,25 \cdot 10^7$ эрг/(г. град) и скрытой теплоте плавления $q = 3 \cdot 10^9$ эрг/г) [22].

Таким образом, из общего запаса кинетической энергии Земли, оцениваемой цифрой минимум $4,3 \cdot 10^{38}$ эрг, при формировании земной коры магматическим путем было утеряно энергии $6,5 \cdot 10^{35}$ эрг или в среднем $1,63 \cdot 10^{26}$ эрг/год.

В астрономической литературе отмечается, что радиус Земли уменьшается со скоростью примерно 5 см за 100 лет [2]. Рассматривая перемещение на малую величину $\Delta R = 5$ см к центру Земли внешней ее оболочки мощностью $h = 150$ км, средней плотностью $3,5$ г/см³ и радиусом 6370 км, легко убедиться, что при таком перемещении энергия положения (потенциальная энергия) этой оболочки изменится за 100 лет на величину $\Delta W \approx 4\pi R^2 \rho gh \cdot \Delta R = 1,25 \cdot 10^{30}$ эрг или за год на величину $1,25 \cdot 10^{28}$ эрг. Эта энергия на два порядка больше соответствующей удельной энергии, необходимой для образования коры магматическим путем и на два—три порядка больше годовой энергии всех землетрясений (10^{25} — 10^{26} эрг/год).

Следует отметить, что достаточно мощным источником тепла для поддержания активности глубинных магматических очагов является также энергия, которая заимствуется из энергии осевого вращения Земли при торможении ее лунно-солнечными приливами. Энергия последних, диссипирующая в водоемах астеносфере, внешнем жидком ядре Земли, а также в зонах разломов, пластических шарнирах и магматических расплавах, составляет за год $1,2 \cdot 10^{27}$ эрг, причем по оценкам Мунка и Макдональда [9], 37% этой энергии диссипирует в океанах и морях (в основном в мелководных их частях). Остальная часть

приливной энергии (63%) в несколько раз превышает то количество энергии, которое необходимо для становления коры магматическим путем.

В общем случае при гомологическом сжатии Земли выделяется кинетическая энергия в количестве

$$\Delta U = \frac{3}{5-n} \cdot \frac{GM^2}{(3\gamma-3)R} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{W}{(3\gamma-3)} \cdot \frac{\Delta R}{R}.$$

Подставляя сюда значения потенциальной энергии гравитационного поля Земли $W = 2,54 \cdot 10^{39}$ эрг, гравитационной постоянной $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$ см³/г.сек², массы Земли $M = 5,98 \cdot 10^{27}$ г, радиуса $R = 6,37 \cdot 10^8$ см, индекса полнотроны $n = 0,5854$, $\Delta R/R = 10^{-10}$ год⁻¹, получим годовой выход кинетической энергии в толще Земли $\Delta U = 4,3 \cdot 10^{28}$ эрг при $\gamma = 3$ (слабо диссипативная модель Земли). В последнем случае значительная часть (5/6) энергии гравитационного сжатия переходит в энергию простого гидростатического сжатия вещества планеты, накапливается в прочных ее слоях в виде потенциальной энергии деформации, поглощается веществом при эндотермических фазовых переходах и формировании химических связей, расходуется на ускорение вращательного движения Земли, на увеличение энергии орбитального движения Луны и др. [2, 18, 22].

Здесь следует отметить, что в случае отставания темпов теплоотвода от темпов сжатия Земли, вещество мантии должно размягчаться и в тех зонах, где имеются неоднородности, отличающиеся относительно невысокой температурой плавления, будут образовываться магматические выплавки, которые в дальнейшем в процессе гравитационной усадки и дизъюнктивного расчленения мантии выжимаются в разрывы литосферы. Этапы подобного отставания в темпах теплоотвода будут, очевидно, этапами ограниченного увеличения объема Земли*. В целом

* Для totally расширяющейся модели Земли, пронизанной сетью зияющих раздвигов глубокого заложения, можно вести следующие оценочные расчеты высоты подъема магмы.

1) Высота подъема лавы по зияющему раздвигу (по шахте) за счет собственного тепла равняется $h \approx c(t_1 - t_2)/g$. Принимая теплоемкость базальтовой лавы $c = 10^7$ эрг/(г.град), исходную температуру лавы t_1 (на глубине h), температуру лавы в кратере вулкана t_2 и $g = 1000$ см/сек², получим при $h = 8$ км, $\Delta t = t_1 - t_2 = 80^\circ\text{C}$, а при $h = 80$ км, $\Delta t = 800^\circ\text{C}$, т. е. для того, чтобы лава могла адиабатически подниматься из кровли астеносферы на дневную поверхность, она должна иметь исходную температуру минимум 2100°C . При этом необходимо значительное содержание в ней летучих компонентов, играющих роль транспортера (содержание летучих ничтожно в эколлит-перидотитовой магме и достигает 7% в толентовой магме).

2) Минимальная мощность верхов астеносферного слоя гипоматмы, необходимая для ее разуплотнения, вспучивания и гидростатического подъема по зияющим раздвигам до земной поверхности, равняется $\Delta H \approx H_b \rho_v / \rho_a$. Принимая мощность литосферы $H_b = 80$ км, плотность ее $\rho_v = 3,13$ г/см³ (по Буллеу), плотность астеносферы $\rho_a = 3,48$ г/см³ (по Берчу), получим $\Delta H \approx H_b = 80$ км, т. е. при тотальном расширении Земли и расчленении литосферы и верхней мантии на расходящиеся блоки

поток тепла из Земли, моделируемый как процесс эксфильтрации (диффузии) фононного газа, фильтр-прессинговый механизм экструзии относительно жидких и маловязких фракций глубинного вещества и дегазация этого вещества представляют в совокупности явления, минимизирующие свободную энергию и энтропию Земли и препятствующие отклонениям ее от состояния устойчивого равновесия.

Институт геологических наук
АН Армянской ССР

Поступила 23.VII.1976.

Ա. Տ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ

ԿՕԿԼՈՂ ԵՐԿԵՐՆ ԻԲՐԵՎ ՀԵԼՏԻՐ-ՊՐԵՍՍԻՆԳՅՈՒ ՄԵԽԱՆԻԶՄ
ԷԽՏՐՈՅՆԱԿՄԱՏԻԿ ՀԱՆՈՅՔՆԵՐԻ ԷՔՍՏՐՈՒԶԻՅՈՅՑԻ ՀԱՄԱՐ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Երկրի գրավիտացիոն կծկման պրոցեսում ընդերքում գտնվող կաթիլային հալոցքները արտամղվում են խզումնային զոնաների մեջ և ապա կծկման նույն ուժերի ազդեցության տակ բարձրանում կեղևի վերին հորիզոնները: Այստեղ այդ ուժերին գումարվում են արգիմեդյան, էրիֆտյան և մյուս ուժերը, որոնք նպաստում են մագմատիկ հալոցքների հետագա վերելքին:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Асланян А. Т. Исследование по теории тектонической деформации Земли. Ереван, 1955.
2. Асланян А. Т. Термо-гравитационный критерий изменения объема Земли. Известия АН Арм. ССР, Науки о Земле, № 3, 1976.
3. Влодавек В. И. Вулканическая деятельность в цифрах и некоторые выводы. Геодинамика, магмообразование и вулканизм, Петропавловск-Камчатский, 1974.
4. Голдрайх П., Пил С. Динамика вращения планет. В сб. «Приливы и резонансы в солнечной системе», М., 1975.
5. Горшков Г. С. Проблемы современной вулканологии. В сб. «Эволюция вулканизма в истории Земли», М., 1974.
6. Грейтон Л. Предположения о вулканическом тепле. М., 1949.
7. Джекобс Дж. А., Рассел Л. А., Уилсон Дж. Т. Физика и геология. М., 1964.
8. Джеффрис Г. Земля. М., 1960.
9. Макдональд Г., Манк У. Вращение Земли. М., 1964.
10. Макдональд Г. Вулканизм. М., 1975.
11. Малеев Е. Ф. Вопросы планетарной эволюции вулканизма. В сб. «Геодинамика, магмообразование и вулканизм», Петропавловск-Камчатский, 1974.
12. Моррисон Л. Вековое ускорение орбитального движения Луны и вращения Земли. В сб. «Приливы и резонансы в солнечной системе», М., 1975.
13. Оганезов Г. Г. К теории тектонической деформации земного сфероида. Известия АН Арм. ССР, Науки о Земле, № 2, 1976.

наступает изостатическое равновесие между текучими массами, исчезают аномалии силы тяжести и деформирующие напряжения, происходит поднятие континентов и регрессия эпиконтинентальных морей.

14. Паталаха Е. И., Авдеев А. В. О механизме подъема магм. Известия АН СССР, серия геол., № 5, 1975.
15. Раст Н. Зарождение, подъем и становление магм. В сб. «Механизм интрузий магмы», М., 1972.
16. Ритман А. Вулканы и их деятельность. М., 1964.
17. Федотов С. А. Геофизические данные о глубинной магматической деятельности под Камчаткой и оценка сил, вызывающих подъем магм к вулканам. Известия АН СССР, серия геолог., № 4, 1976.
18. Cook M. A., Eardley A. J. Energy requirements in terrestrial expansion. Journ Geophys. Res., 66, № 11, 1961.
19. Jeffreys H. Deep focus earthquakes. Ergebnisse kosmischen Physik, 4, 1939.
20. Seyfert C. K., Sirkin A. L. Earth history and Plate tectonics, N. Y., 1973.
21. Shidegger A. E. Principles of Geodynamics, Springer—Verlag, 1958.
22. Yokoyama I. Energetics in Active Volcanoes, Bull. of the Earthquake. Res. Inst. of Tokyo, v. 35, part 1, 1957.