

А. Т. Асланян

Связь вулканической деятельности с деформациями земной коры*

(Представлено действ. чл. АН Арм. ССР Н. Х. Арутюняном 28 VII 53)

1. Вулканическая деятельность, определяемая как процесс извержения из подкоровых областей огненно-жидких, пирокластических и газообразных масс, связывается во времени с периодами эластических волнообразных деформаций земной коры, что доказывается:

а) фаціальным смыканием и переслаиванием вулканогенных образований с нормально-осадочными морскими и континентальными отложениями;

б) приуроченностью вулканогенных образований к низам нормально-осадочных формаций;

в) закономерным сочетанием рядов современных вулканов с поясами тектонических землетрясений, гравитационных аномалий, передовых прогибов и сводообразных поднятий коры (1, 3, 6).

2. Глубинные высоконагретые дисперсные массы, питающие вулканы, представляются в виде сплошного упругого основания, подстилающего жесткую кору-оболочку (6).

Согласно указанной автором (4) формуле $\sigma_s = D_1 H \frac{12-24\nu}{11-16\nu}$ (где

σ_s — предел текучести материала коры, D_1 — удельный вес его, ν — коэффициент поперечного сжатия, H — мощность коры) при $\sigma_s = 10000 \text{ кг/см}^2$, $D_1 \geq 3 \text{ г/см}^3$, массы, залегающие на глубинах значительно больше 40 км, должны обладать коэффициентом поперечного сжатия $\nu = 0,45$ — $0,49$, что могло характеризовать вещества типа полимеров.

Моделирование подкоровых масс как пространственных полимеров типа каучука, бакелита и др. предписывает им возможность течения, коробления, продавливания, кристаллизации, затвердевания, а также срезывания, необходимых для объяснения землетрясений.

3. При гравитационном сжатии внутренних масс (астеносферы) земная кора деформируется под собственным весом, как оболочка на сплошном упругом основании.

* Основные положения доклада, сделанного на сессии Отделения технических наук Академии наук Армянской ССР 14 апреля 1953 г.

Уравнением потери устойчивости полосы коры под действием осевой сжимающей силы является:

$$\frac{EH^3}{12(1-\nu^2)} \omega \lambda^4 + \omega H \sigma_x \lambda^2 + \omega \left(k + \frac{EH}{R^2} \right) = 0,$$

которое при синусоидальном характере прогибов и поднятий коры ($\lambda = \frac{m\pi\sqrt{-1}}{l}$), т. е. при уравнении упругой линии изогнутой коры

$\omega = C \sin \frac{m\pi x}{l}$ дает для критических значений ширины прогибов и соответствующих им значений критических напряжений величины:

$$L_m = \frac{l}{m} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{\frac{EH^3}{3(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{k + \frac{EH}{R^2}}},$$

$$\sigma_m = m^2 \sqrt{\frac{EH}{3(1-\nu^2)} \left(k + \frac{EH}{R^2} \right)}.$$

В случае комбинированного действия изгибающих и сжимающих сил—

$$L_m = \frac{l}{m} = \frac{\pi}{\sqrt{1+z}} \sqrt[4]{\frac{EH^3}{3(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{k + \frac{EH}{R^2}}} \quad (8)$$

В этих уравнениях l — длина полосы коры, измеряемая в направлении действия осевой силы $P_x = H\sigma_x$ (вдоль координаты x), E — модуль упругости коры, ν — коэффициент поперечного сжатия, H — мощность, ω — прогибы (поднятия), C — постоянная, имеющая размерность ω , m — число полуволов, R — радиус Земли, k — разность между удельным весом D_2 подкоровых масс и удельным весом D_0 , покрывающих кору гидростатически распределенных масс, z — отношение докритических сжимающих напряжений к критическим напряжениям.

4. Для $m=1$, $z=0$ и $k=0$ (отсутствие упругого основания) из последнего уравнения получаем:

$$L_{max} = \pi \sqrt[4]{\frac{R^2 H^2}{3(1-\nu^2)}},$$

что при $E = 750000 \text{ кг/см}^2$, $H = 37 \text{ км}$, $R = 6371 \text{ км}$, $\nu = 0,25$ дает $L_{max} = 1200 \text{ км}$ (геосинклинальные системы) и наложенные на эти полуволовны разнообразные прогибы и поднятия шириной от 880 до 200 км ($k + \frac{EH}{R^2} < D_2 - D_0 = 3,32 - 1,03 = 2,29 \text{ г/см}^3$). Значению $L = 1200 \text{ км}$

соответствует $\sigma_{min} = \frac{EH}{R\sqrt{3(1-\nu^2)}} = 2400 \text{ кг/см}^2$.

Возникновение таких крупных прогибов и поднятий возможно, следовательно, лишь при наличии податливого основания, которое создается при перманентном уменьшении радиуса подкоровой области.

Для $m = 1, z = 0, k = D_2 - D_0 = 2,29 \text{ г/см}^3$, когда величиной $\frac{EH}{R^2}$ по сравнению с k можно пренебречь:

$$L = \pi \sqrt[4]{\frac{EH^3}{3k(1-\nu^2)}} = 200 \text{ км},$$

чему соответствует $\sigma = \sqrt{\frac{EHK}{3(1-\nu^2)}} = 58000 \text{ кг/см}^2$.

При дальнейшем нарастании напряжений на эти полуволны должны накладываться полуволны длиной

$$L' = \frac{L}{m} = \frac{\pi}{m} \sqrt[4]{\frac{EH^3}{3k(1-\nu^2)}}$$

при $m = 1, L' = L = 200 \text{ км}$, при $m = 2, L' = 100 \text{ км}$, при $m = 3, L' = 65 \text{ км}$ (ширина волн измеряется вдоль изогнутой оси). Случаю

$m = 2$ соответствует $\sigma = m^2 \sqrt{\frac{EHK}{3(1-\nu^2)}} = 232000 \text{ кг/см}^2$, а случаю

$m = 3, \sigma = 522000 \text{ кг/см}^2$. Напряжение, при котором кора плотностью $2,75 \text{ г/см}^3$ разрушается и переходит в текучее состояние, равняется

$\sigma_{max} = \frac{1}{3} D_1 R = 580000 \text{ кг/см}^2$ (при равенстве главных напряжений

и деформаций, т. е. при $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ и $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$).

При плоском напряженном состоянии из известного условия равновесия сферы

$$q\pi \left(R - \frac{H}{2} \right)^2 - D_1 H \pi \left(R + \frac{H}{2} \right)^2 = \sigma 2\pi R H$$

получаем для случая контракции астеносферы (когда противодавление

подкорковых масс $q = 0$) $\sigma_{max} = \frac{1}{2} D_1 R = 875000 \text{ кг/см}^2$ (9).

5. Глубина прогибов, соответствующих отдельным критическим нагрузкам, определяется по формуле

$$\omega = \frac{H\sigma_{кр}}{kR},$$

которая для $k = 2,29 \text{ г/см}^3, R = 6371 \text{ км}, H = 37 \text{ км}$ дает для $\sigma = 58000$ $\omega = 1,45 \text{ км}$, для $\sigma = 232000 \text{ кг/см}^2, \omega = 5,9 \text{ км}$ и для $\sigma = 522000 \text{ кг/см}^2, \omega = 13 \text{ км}$.

Полученные здесь высокие значения тангенциальной компоненты напряжений являются приведенными, поскольку для тонких оболочек типа земной коры теорема единственности не доказана.

6. Противодавление магматического основания на сжатую изогнутую кору равняется:

$$q = Q \pm k\omega = D_1H \pm \frac{H\sigma}{R},$$

причем оно максимально в прогнутых зонах и минимально в зонах поднятий (Q —вес колонны коры). При $\sigma = 232000 \text{ кг/см}^2$, $Q = 10000 \text{ кг/см}^2$ крайними значениями q будут 8500 кг/см^2 и 11500 кг/см^2 . При 520000 кг/см^2 $q_{\min} = 6625 \text{ кг/см}^2$, $q_{\max} = 13375 \text{ кг/см}^2$ (при деформациях, не осложненных явлениями осадконакопления).

Указанная зависимость предполагает сжатие и уплотнение магматических масс в прогнутых зонах коры и расширение, перемешивание и кипение в зонах сводообразных поднятий коры.

7. Поскольку деформации изгиба осложняются разрывными деформациями в виде трещин растяжения, сдвиговых разломов и трещин обрушения (последние приурочиваются исключительно к зонам сводообразных поднятий, пример—кальдеры опускания), то таковые делают кору проницаемой в отношении подкоровых магматических масс, причем под непосредственным влиянием тектонических сил дневной поверхности могут достигать лишь магматические массы прогнутых зон, где противодействие магмы на единицу поверхности превосходит начальный вес колонны коры ($q > D_1H$). Такой насильственной инъекцией объясняется геосинклинальный (депресссионный) вулканизм, включая малые, пластовые и трещинные инъекции, в том числе и пояса офиолитов, приуроченных к осевым полосам единичных прогибов коры. Парность офиолитовых поясов, отмеченная В. Е. Хаиным и В. Л. Егояном⁽¹⁰⁾, объясняется тем, что в прогибах коры шириной порядка 200 км, отвечающих критической нагрузке около 60000 кг/см^2 , могут образоваться максимум три полуволны (два прогиба и разделяющее их одно поднятие или наоборот), шириной порядка 60 км, отвечающие пределу разрушения коры порядка 520000 кг/см^2 .

8. Поднятие магмы на дневную поверхность в зонах сводообразных поднятий коры, где $q < D_1H$, требует собственных дополнительных источников энергии.

Поскольку магматические массы содержат значительное количество растворенных несжимаемых газов (минимум от 4 до 12% от их веса), имеют высокую температуру (порядка $1500\text{--}2000^\circ\text{C}$) и в зонах сводообразных поднятий вследствие неравенства $q < D_1H$ происходит расширение масс, то источником дополнительной энергии, налагаемой на тектоническую энергию (противодействие субстрата) должно служить собственное тепло магмы, расходуемое на работу расширения газов.

Условия расширения усматриваются в уравнениях:

$$D_1Hv_1^k = qv_2^k = \text{const},$$

$$t_2 = t_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1},$$

где— t_1 , v_1 и t_2 , v_2 —объем и температура газов до и после изгибания коры, k —постоянная, принимаемая для магматических газов равной

1,33. Условие $q=0$, возможное при мгновенном разрыве коры или отрыве ее от субстрата, предполагает неограниченно большое увеличение объема газов и пробивание коры взрывом по принципу кумулятивного заряда.

Расход собственного тепла магмы в количестве, необходимом для подъема магмы из недр на дневную поверхность при открытом канале и адиабатическом ходе процесса, определяется из элементарной формулы

$$\Delta t = t_h - t_0 = \frac{gh}{c},$$

где t_h — температура магмы на глубине h , t_0 — температура лавы в жерле вулкана, g — ускорение силы тяжести, c — удельная теплоемкость лавы в жерле вулкана. При $t_0 = 1200^\circ$, $g = 981 \text{ см/сек}^2$, $h = 40 \text{ км}$, $c = 1,25 \cdot 10^7 \text{ эрг/г}$ — это количество соответствует падению первоначальной температуры магмы на $\Delta t = 320^\circ$ (7).

9. Вязкость магматического расплава на глубине определяется зависимостью $\eta = \eta_0 e^{-\alpha q}$, где η_0 — вязкость лавы в жерле вулкана (от 1 до 100 пуаз), e — основание натуральных логарифмов, α — постоянная. При $q=0$, $\eta = \eta_0$, т. е. при раскрытии трещин или отрыве коры от магматического основания вязкость материала последнего, оцениваемая величиной от 10^{19} до 10^{21} пуаз, снижается до 1—100 пуаз, т. е. уменьшается в 10^{19} раз.

По формуле Стокса $v = \frac{\Delta \rho d^2}{18 \eta}$ снижение η до 1 пуаз дает при

$\Delta \rho = 1 \text{ г/см}^3$ (разность удельных весов расплава и рассеянных в нем кристаллов) и $d = 1 \text{ мм}$ (диаметр кристаллов) обеспечивает огромную возможность гравитационной дифференциации магмы при $q=0$ со скоростью сепарации кристаллов порядка $v = 100 \text{ см/минута}$ против $10^{-17} \text{ см/минута}$ при $\eta = 10^{19}$ пуаз.

10. Согласно уравнению равновесия коры

$$Q - q + \frac{H\sigma}{R} = 0,$$

уничтожение вулканической активности возможно вследствие восстановления гидростатического равновесия коры (орогенез), когда $q \rightarrow 0$ и кора находится в относительном тектоническом покое ($\frac{H\sigma}{R} \rightarrow 0$), что в свою очередь возможно при появлении в коре зон текучести (гранитизация, региональный метаморфизм и инверсия в интрагеосинклинальных зонах), приводящей к выпрямлению коры и закрытию подводящих магму каналов (6).

Временный покой в деятельности отдельных вулканов (ритмичность) возможен согласно уравнению $\Delta t = \frac{gh}{c}$ также вследствие энер-

гичных извержений, поглощающих большую часть тепла материнского расплава на глубине ($\Delta t \rightarrow 0$) и временно переводящих расплав из жидкого состояния в твердое состояние.

Концентрация вулканов в Тихоокеанском кольце и Альпийско-Гималайском поясе, отмеченных также высокой сейсмичностью, интенсивными гравитационными аномалиями и большими градиентами изгибания коры, объясняются максимальной концентрацией деформаций скользящей коры в этих зонах⁽⁵⁾, где устойчивость коры, ввиду резкого уменьшения ее мощности (переход от мощных континентальных платформ к тонким океаническим платформам), минимальна. При этом дугообразный характер зон вулканической деятельности объясняется дугообразным же характером зон деформаций, являющихся при сферичности коры и контракционном механизме ее коробления энергетически более экономными формами деформации, чем прямолинейные формы, развивающиеся по большим кругам и требующие, вследствие большой разности между дугой и хордой, максимального количества энергии коробления.

Этим же объясняется концентрация вулканических очагов в срединных отрезках внешних выгнутых частей дуг, где теоретически максимальным должно быть число трещин растяжения, служащих в большинстве случаев каналами для подъема магмы⁽⁶⁾.

11. Вследствие волнообразного коробления коры в зонах вулканической деятельности должны наблюдаться гравитационные аномалии величиной

$$\pm \Delta g = 2\pi f \frac{H\sigma}{R} = 2\pi f k w,$$

обусловленные излишком масс $\frac{H\sigma}{R}$ и отнесенные к первоначальному недеформированному (изостатическому) состоянию коры⁽⁶⁾. Подстановка $f=6,67 \cdot 10^{-8}$, $H=37 \cdot 10^5$ см, $\sigma=232 \cdot 10^6$ г/см², $R=6,35 \cdot 10^8$ см дает $\Delta g = \mp 406$ миллигал—для современных наиболее глубоких прогибов (соответственно и поднятий) и ± 102 миллигал для прогибов и поднятий, которым соответствует $\sigma=58 \cdot 10^6$ г/см² и $w=1,45$ км. Крайние значения аномалий в таких зонах простираются в интервале от -337 миллигал (у Антильской вулканической дуги) до $+669$ миллигал (на Гавайском вулкане Мауна Кеа).

12. Под углом зрения эволюции Земли, как небесного тела, вулканическая деятельность, стимулируясь эластическими деформациями коры, отражающими процесс нарушения сфероидальной равновесной конфигурации планеты, отражает по существу процесс восстановления сфероидальной гидростатически уравновешенной конфигурации, будучи одновременно процессом гравитационной дифференциации вещества планеты.

Институт геологических наук
АН Арм. ССР

**Հրաբխային գործունեության կապը երկրի կեղևի
դեֆորմացիաների հետ**

Երկրի ընդերքում գտնվող շիկացած մագմատիկական զազախառն զանգվածները դիտվում են իբրև համատարած առաձգական հիմք քարային կեղևի համար, որի հաստությունը միջին հաշվով կազմում է 37 կմ:

Մոլորակի ընդերքի զանգվածների համաչափ խտացման և կծկման հետևանքով կեղևը սեփական քաշի ազդեցության տակ ենթարկվում է ալիքային դեֆորմացիաների, տալով կիսաալիքներ 1200, 200, 100 և 60 կմ երկարությամբ:

Կեղևի ճկման գոտիներում, նրա ստորին հորիզոններում առաջանում են ձգման ճեղքվածքներ, որոնցով կեղևի վրա ներգործող ուժերի ազդեցության տակ մագման առանձին կանալներով ներարկվում է կեղևի մեջ՝ տալով ճեղքվածքային, «մանր», օֆիոլիտային ինտրուզիաներ կամ հասնելով վերին հորիզոններին փոխանցվում է էֆուզիվ հրաբուխների (գեոսինկլինալային հրաբխականության):

Կեղևի կամարաձև բարձրացման գոտիներում մագման բեռնաթափվում է, հեղուկանում և իր մեջ լուծված գազերի օգնությամբ, որոնց պարունակությունը հասնում է մինչև 12%, արտավիժում է մակերևույթ (գեոանտիկլինալային հրաբխականություն): Ենթակեղևային զանգվածներն ըստ իրենց ֆիզիկական հատկությունների համեմատվում են պոլիմերների (կաուչուկ, բակելիտ և այլն) հետ, ունեն լայնական կծկման գործակից 0,43—0,49 սահմաններում, որի հետևանքով նրանք ընդունակ են միաժամանակ հոսելու, ծալքավորվելու, արտահոսելու, բյուրեղանալու և կտրվելու, որպիսի պայմանն անհրաժեշտ է երկրաշարժերի ծագումը բացատրելու համար:

Կեղևի դեֆորմացիաների ժամանակ առաջանում են լարվածություններ մինչև 560.000 կգ/սմ², որոնք պայմանավորում են ծանրության ուժի անոմալիաներ մինչև 406 միլիգալ, ըստ որում զրական անոմալիաները կապվում են կեղևի կամարաձև բարձրացման գոտիների հետ (գեոանտիկլինալային հրաբխականության գոտիներ), իսկ բացասական անոմալիաները իջեցման (ճկման) գոտիների հետ (գեոսինկլինալային հրաբխականության գոտիներ):

Նշված ուժերի ազդեցության տակ առաջանում են ճկվածքներ մինչև 12 կմ խորությամբ:

Հրաբխային գործունեության զազար տեղի է ունենում ծալքավոր լեռնակազմության էտապներում, երբ կեղևի ճկվածքներում առաջանում են հոսունության զոնաներ, և վերականգնվում է կեղևի կորսված հիդրոստատիկ հավասարակշռությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А — Գ Ր Ա Կ Ա Ն Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

¹ А. Д. Архангельский, Геология и гравиметрия. М—Л., 1933. ² А. Т. Асланян, О причине вулканических явлений, ДАН Армянской ССР, т. XIII, № 5, 1951. ³ А. Т. Асланян, Известия АН Армянской ССР, серия ФМЕТ наук, т. IV, № 3, 1951. ⁴ А. Т. Асланян, ДАН Армянской ССР, т. XIV, № 5, 1951. ⁵ А. Т. Асланян, Известия АН Армянской ССР, т. V, № 4, 1952. ⁶ Ф. А. Венинг-Мейнес, Гравиметрические наблюдения на море, М—Л., 1940. ⁷ Л. К. Грейтон, Предположения о вулканическом тепле. Перевод под редакцией и с предисловием А. Н. Заварицкого, М., 1949. ⁸ С. П. Тимошенко, Устойчивость упругих систем, М.—Л., 1949. ⁹ В. И. Федосьев, Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов, М—Л., 1950. ¹⁰ В. Е. Хаин и В. Л. Егоян (печатаются в ДАН СССР, 1953).