

Как и где образуются магмы?

В. В. Велпский
Кандидат
геолого-минералогических наук
Новосибирск

При извержении Везувия в 79 г. н. э. под потоками раскаленной лавы и грязи, под градом камней и пепла за 48 часов были погребены три древнеримских города — Помпеи, Геркуланум и Стабия; погибло около 30 тыс. человек. С тех пор Везувий извергался еще много раз. В 1669 г. во время извержения Этны на побережье Средиземного моря погибло почти 100 тыс. человек; взрыв в 1815 г. вулкана Тамборо на о-ве Сумбава (Индонезийский архипелаг) унес около 90 тыс. человеческих жизней; жертвами взрыва Кракатау в 1883 г. (Индонезийский архипелаг) стали почти 40 тыс. человек. Перечень таких катастроф можно было бы продолжить. Вполне понятен поэтому тот интерес, который ученые разных времен и народов проявляют к этим грозным явлениям природы.

Развитие науки и техники дало возможность специалистам различных профессий собрать богатейший материал, который позволил проникнуть в тайны этих необыкновенных по силе и грандиозности явлений. Они протекают, кстати, не только на Земле: астрономы предполагают вулканическую деятельность на Венере, Марсе и других планетах солнечной системы. Широко проявились вулканические процессы на Луне, в одном из кратеров которой не так давно было зафиксировано видимое истечение газов.

Собранный по отдельным вулканам материал позволил ученым выявить общие закономерности в развитии вулканизма: пространственное распределение вулканов и приурочен-

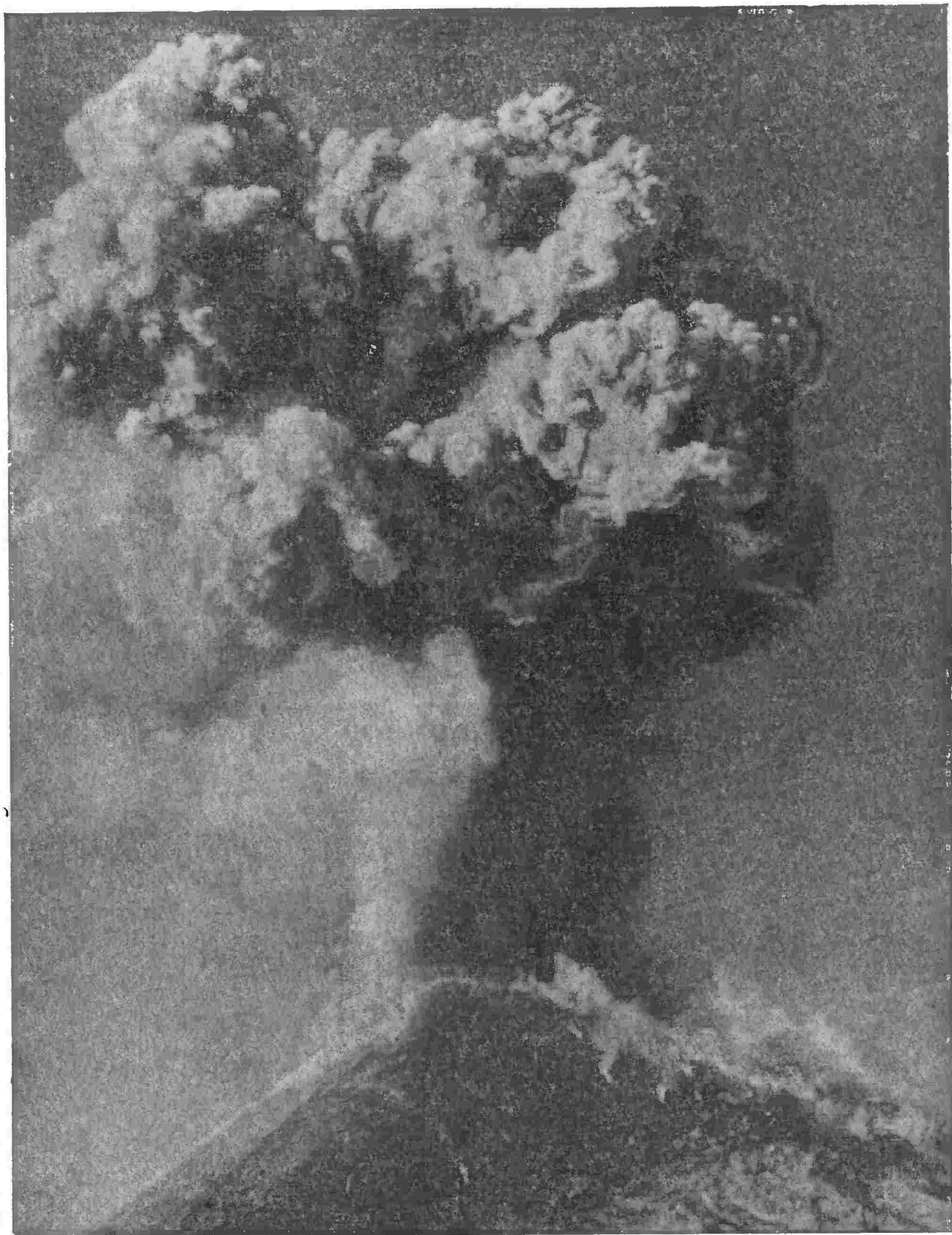
ность их к определенным структурам Земли, связь извержений с землетрясениями и с характером солнечной активности, а также установить, какие явления сопровождают извержения и какие предшествуют им.

Что же известно нам о современных (четвертичных) вулканах? В первую очередь, надо отметить связь их с определенными структурными элементами Земли, и в частности с теми ее зонами, которые, как считают некоторые ученые, в настоящее время испытывают так называемые напряжения растяжения. По-видимому, с ними связано образование в земной коре и мантии глубоких трещин (разломов), по которым расплавленный материал устремляется к поверхности. Вне развития трещин вулканизм и магматизм вообще не проявляются. Такие зоны трещиноватости протягиваются на многие сотни и тысячи километров, образуя громадные пояса. Это — хорошо известные районы вулканической деятельности, расположенные по западной и восточной окраинам побережья Тихого океана, и пояс широтного простиранья, протянувшийся от берегов Атлантического океана через области Средиземноморья, Альп и Кавказа и далее на восток через Тянь-Шань и Гималаи. Кроме того, вулканизм широко проявился в пределах океанов, где вулканические аппараты приурочены к крупным разрывным нарушениям. Основная масса наземных и подводных вулканов располагается в интервале, ограниченном 60° с. и ю. широты, и лишь очень незначительное число их выходит за пределы этих границ (Исландия, вулканы Чукотки и

Антарктиды). Районы интенсивного вулканизма совпадают с великими сейсмическими поясами Земли, где наблюдается наивысший, идущий из недр Земли, тепловой поток, который может достигать величины $6-7 \cdot 10^{-6}$ кал/см²·сек (величина теплового потока вне этих областей колеблется около $1,5 \cdot 10^{-6}$ кал/см²·сек). Зоны вулканической деятельности характеризуются повышенными магнитными аномалиями (до 800 гамм и более) и одновременно представляют собой области, под которыми с глубиной резко (на 2—3 порядка) повышается электропроводность пород.

К районам активного вулканизма приурочены обширные поля, на территории которых из недр Земли интенсивно выделяются горячие газовые и водные источники. В составе газов — более 95% водорода и паров воды, в незначительной степени содержится углекислый газ. В деятельности этих источников наблюдается строгая закономерность. Она выражена в том, что перед началом извержений возрастает их интенсивность и меняется качественная характеристика газов. Важно, что основные изменения в составе газов связаны с увеличением в них количества водорода, а также гелия и аргона-40.

Обычно непосредственно перед извержением из кратера вулканов вырываются мощные струи газа, после чего происходят выбросы пепла и изливание лавы, которое также сопровождается выделением газа. Несколько примеров позволяют количественно представить себе этот процесс. В 1906 г. при извержении Везу-



Извержение вулкана Карымский на Камчатке, май 1963 г.

вия выбросы газа образовали струю диаметром около 500 м и высотой 13 км; скорость газового истечения достигала 500 м/сек. В 1929 г. при извержении Везувия выделилось $5 \cdot 10^8$ м³ газа. В 1955—1956 гг. во время извержения вулкана Безымянный на Камчатке начальная скорость выброса была около 500—600 м/сек, диаметр струи — 250 м, высота — 8 км, начальное давление газов — около 3 тыс. атм. В среднем количество газов, выделяемых при вулканических извержениях, составляет около 2% от веса лавы, а при сильных — до 3%.

Все эти факты показывают, что в районах интенсивной вулканической деятельности совершаются активные процессы, которые приводят к образованию в недрах Земли значительных масс расплавленного материала, при благоприятных условиях изливающегося на поверхность. По мнению ученых, выплавление вещества — образование очагов — происходит на значительных глубинах, в пределах верхней мантии Земли. Геологи эту расплавленную массу (силикатный расплав-раствор) называют магмой. Застывая на поверхности, магма образует эффузивные породы (базальты, андезиты, липариты и т. д.); при застывании магмы на глубине образуются интрузивные породы (гранит, диориты, габбро и др.).

Знание механизма образования магмы внутри оболочек Земли имеет огромное значение. Помимо теоретического интереса этот вопрос чрезвычайно важен в практическом отношении, так как непосредственно с магмой или процессами, сопутствующими ее образованию, связаны проявления большинства рудных полезных ископаемых. Механизм образования магмы невозможно постичь без всестороннего изучения явлений, связанных с деятельностью вулканов. Природа сама создала для нас гигантские лаборатории, в которых мы можем расшифровать этот очень сложный и многосторонний процесс. Однако, несмотря на огромный материал, которым располагают геологи в области вулканологии и петрографии магматических пород, а также в об-

ласти тех процессов, которые протекают в самой магме, мы не знаем, каким путем, в результате каких явлений происходит ее образование.

Современные геологические данные, подкрепленные экспериментальными работами, позволяют говорить о существовании в глубинах Земли по крайней мере двух типов магм — базальтовой и гранитоидной, которые отличаются друг от друга по составу слагающих их компонентов. Базальтовая, или основная, магма, содержит до 50% кремнезема, обогащена элементами группы железа и магния и обеднена щелочами. Гранитная, или кислая, магма богата кремнеземом (более 65%), обеднена окислами магния и железа и обогащена щелочами (натрий и калий).

В настоящее время геологи считают, что магма образуется за счет выплавления вещества из различных оболочек Земли. При этом базальтовая магма является производной вещества верхней мантии, а гранитоидная — силикатической коры, которая перекрывает верхнюю мантию. На этом, собственно, и кончается единство мнений геологов по вопросу генезиса магм и магматических очагов, поскольку одни считают далее, что магма образуется за счет выплавления под воздействием тепла, которое выделяется при распаде радиоактивных элементов, а другие связывают ее образование с изменением в недрах Земли термодинамических условий (в основном давления) в результате возникновения глубоких трещин в земной коре и мантии. Не останавливаясь на детальном разборе этих гипотез, замечу лишь, что они имеют целый ряд недостатков, которые не позволяют объяснить все те различные явления, которые сопровождают образование магматических очагов и вулканическую деятельность.

В первую очередь надо отметить, что извержения вулканов всегда сопровождаются громадным выделением газов. Акту извержения сопутствует увеличение активности газовых источников, расположенных в районе вулканического аппарата, а также увеличение в их составе водорода, гелия

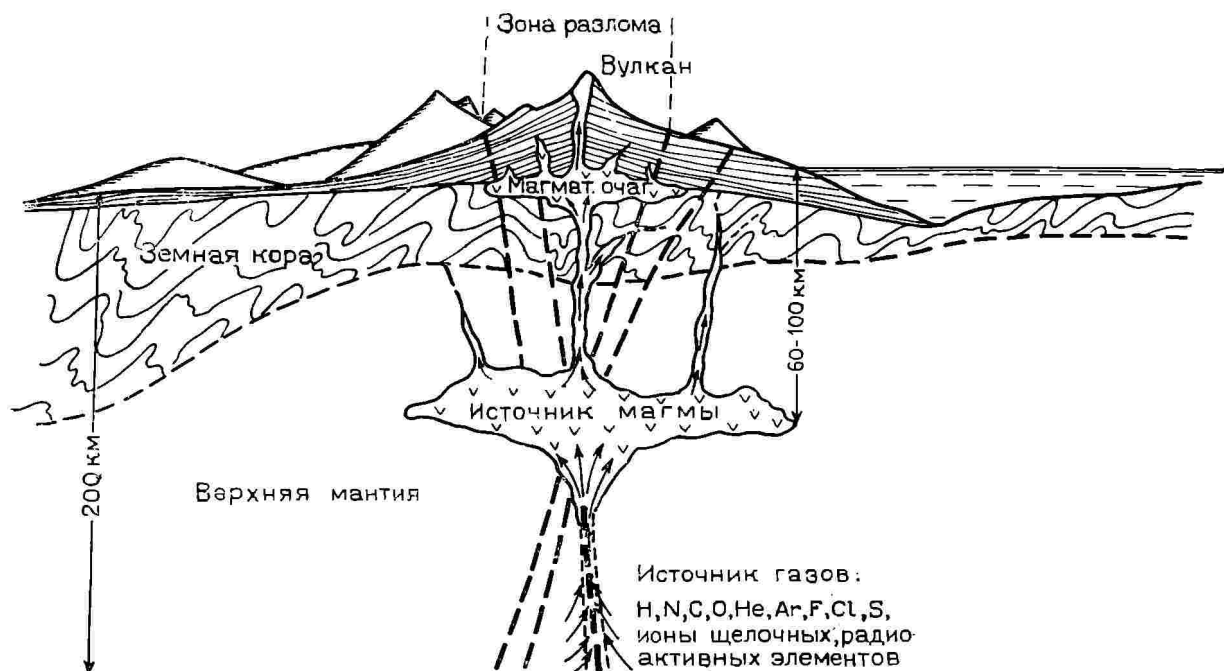


Схема образования основной магмы. Жирным пунктиром показаны разломы в мантии и коре. Внизу стрелками отмечены предполагаемые струи горячего газа, приводящие к образованию магматического очага (источник магмы)

и аргона-40. Кроме того, вулканические извержения сопровождаются обычно грозами, нередко — свечением атмосферы над вулканами и появлением электрических разрядов (огней Эльма) в атмосфере, свечением электропроводов, нарушением радиосвязи, возмущением магнитного поля Земли в районе вулкана и т. д. Наконец, нельзя забывать, что нередко перед началом извержения отмечаются землетрясения, гипоцентр которых располагается в зоне очага; при этом по мере поднятия магмы по подводящему каналу наблюдается быстрое смещение гипоцентра к поверхности Земли.

Все эти факты, как нам кажется, показывают, во-первых, что решающая роль в образовании магматических очагов внутри оболочек Земли принадлежит газам и, во-вторых, что газ находится в ионизованном состоянии. Именно этим и объясняются те побочные явления, которые сопутствуют извержениям.

Подтверждением высказанной точки зрения могут служить такие данные. Акад. А. П. Виноградов, изучая со-

став газовой фазы в каменных метеоритах, которые им рассматриваются как исходное вещество протопланетного облака, показал, что в мантии Земли находится громадное количество газов, внесенных главным образом протопланетным космическим веществом. Эти газы растворены в силикатном веществе мантии и образуют с ним одну фазу. Вторая — собственно газовая, или паровая фаза, по представлениям А. П. Виноградова, содержит в надкритическом состоянии пары, газы и другие вещества и образуется вблизи подкоровой области. Вещества этой фазы очень агрессивны по отношению к окружающим породам. Существованию газов в растворенном состоянии в веществе мантии способствуют высокие значения температур и давлений в пределах оболочек Земли.

О возможном содержании газов в силикатном веществе мантии можно судить по данным А. П. Виноградова: H_2O — $2 \cdot 10^{25}$ г, Na — $8 \cdot 10^{22}$ г, C — $1,6 \cdot 10^{24}$ г, Cl — $2,2 \cdot 10^{23}$ г, S — $7,2 \cdot 10^{25}$ г, Ar — $7 \cdot 10^{20}$ г, He — $3 \cdot 10^{19}$ г. Суммарное количество газов в мантии составляет $9,5 \cdot 10^{25}$ г, а содержа-

ние газов в каждом кубическом сантиметре мантии — 0,1 г. Исходя из предположения, что для вулканов средних размеров магматический очаг представляет собой сферу радиусом в 1 км, нетрудно вычислить количество газов, которое сможет выделиться из этого объема мантии. Для водорода оно составит $\frac{4}{3}\pi R^3 \cdot 0,1 = 4,2 \cdot 10^{14}$ г = $4,2 \cdot 10^8$ м³. Эта цифра очень хорошо согласуется с количеством газов, выброшенных, например, Везувием в течение одного года, — $5 \cdot 10^8$ м³. Таким образом, принятое значение количества газов в мантии не противоречит геологическим фактам и определяется в достаточно надежных пределах. Если это так, то, допуская, что газы растворены в веществе мантии равномерно и что дегазация за время существования планеты также происходила равномерно, нетрудно вычислить количество газов, выделяющихся из недр Земли за один год. А. П. Виноградовым подсчитано, что в среднем за период жизни Земли, т. е. за $5 \cdot 10^9$ лет, было дегазировано от общего количества содержащихся в мантии газов ($9,5 \cdot 10^{25}$ г) около 10%, т. е. $9,5 \cdot 10^{24}$ г. Следовательно, за год выделяется $1,9 \cdot 10^{15}$ г газа. Отсюда удельный расход газов составляет $6,0 \cdot 10^7$ г/сек. Выше уже указывалось, что при извержении Везувия за год было выброшено $5 \cdot 10^8$ м³ газа, или $1,6 \cdot 10^7$ г/сек.

Как видно, полученные цифры удельных расходов газа — одного порядка. Выявленные же различия между расчетными и наблюдаемыми данными обусловлены, с одной стороны, тем, что дегазация в различных частях мантии происходит, по-видимому, неравномерно, а с другой — тем, что для Везувия учтено только то количество газа, которое было выброшено непосредственно при извержении. Количество же газов, выделенных вулканом при фумарольной деятельности, не поддается учету.

Даже эти грубые оценки подтверждают исключительно важную роль газов при извержении вулканов¹. Именно газам и теплу, переносимому га-

зовыми струями, мы придаем основное значение в механизме образования магматических очагов. Исходя из этого, модель магмообразования может быть представлена в следующем виде.

При заложении в земной коре и мантии крупных нарушений — глубинных разломов в их зоне из-за резкого снижения давления (по подсчетам М. В. Гзовского в 1960 г. — до 10 кбар) начинается интенсивная дегазация вещества мантии. Инфильтрация газов (в основном водорода) значительно облегчается высокой проницаемостью зон глубинных разломов, которая поддерживается во времени за счет усилий растяжения, испытываемых этими зонами. Из окружающих дробленных пород и субстрата мантии газы устремляются в наиболее ослабленные зоны — участки, подверженные максимальному растяжению, или места пересечения крупных трещин (к ним обычно и приурочены пояса наиболее активного вулканизма и глубинный магматизм). Движение газов к этим участкам, по-видимому, связано со значительным перепадом давления, который, как нам кажется, объясняется вследствие разности между гидростатическим давлением в породах мантии и коры в ненарушенных участках и дробленных зонах глубинных разломов. Этому движению способствует также установленный по геофизическим данным значительный вертикальный градиент давлений в мантии и коре (около 270 бар/км).

Известно, что магматические очаги современных действующих вулканов в Курило-Камчатском районе располагаются на глубинах от 60 до 100 км. Если допустить, что глубинные разломы проникают в мантию на 200 км и более (по данным глубокофокусных землетрясений), то этот же уровень следует считать основным источником газовых струй¹. Температура вещества мантии, а следовательно и газов, на глубине 200 км приблизительно равна 1500°С, а температура на уровне магматических очагов — 1100—1200°С. Зная

удельный расход газов с единицы площади, их теплоемкость, значение градиентов температур и давлений на разных глубинах, зная плотность пород мантии на различных уровнях, а также их теплопроводность, теплоемкость и температуру плавления при определенных давлениях, можно, по-видимому, при некоторых допущениях рассчитать глубину зарождения очагов и время, необходимое для их образования.

Сравним теперь полученные расчеты с фактическими данными. По предварительным оценкам, для образования по такой схеме очага в виде сферы радиусом в 1 км потребуется около 1500 лет. Эта цифра хорошо согласуется со временем жизнедеятельности отдельных вулканических аппаратов — порядка 10—15 тыс. лет. Решение такой задачи совершенно необходимо, но здесь требуется помощь специалистов-физиков. Надо особо подчеркнуть, что, по нашему предположению, газы, несущие тепло, находятся не в нейтральном, а в ионизованном состоянии. Ионизации способствуют, с одной стороны, высокие значения давлений (на глубине 200 км — порядка 50—55 кбар) и температур (около 1500°С), с другой — присутствие в газах таких легкоионизирующих присадок, как натрий и калий, а также радиоактивных веществ, главным образом урана, тория, калия-40. Степень ионизации, в свою очередь, определяет подвижность газов и агрессивный характер их по отношению к веществу субстрата мантии, где происходит зарождение очага. При этом в общем тепловом балансе ионизованное состояние газов, по мнению физиков, не играет решающей роли¹.

Побочные явления, сопровождающие извержения вулканов (свечение атмосферы, электрические разряды, возмущения магнитных полей и т. д.), понять довольно легко, если привлечь для объяснения ионизованные газы. Механизм этих процессов можно представить в следующем виде.

¹ Не исключено, что при более высоком уровне наших знаний о магнитных явлениях, сопровождающих процессы вулканизма, можно будет говорить о плазменном состоянии газовых струй.

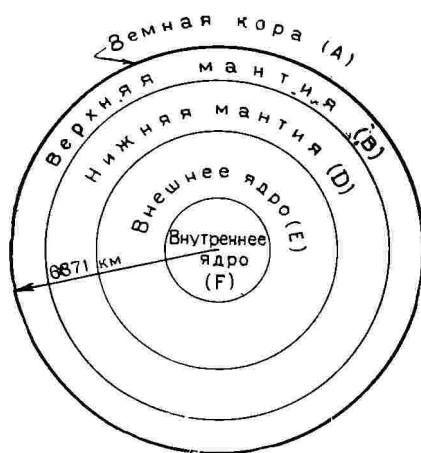


Схема внутреннего строения Земли:
 A — 0—70 км, B — 0—1000 км, D —
 1000—2900 км, E — 2900—5000 км,
 F — 5000—6371 км

Известно, что силикатные расплавы обладают ионной проводимостью с очень небольшой величиной электрического сопротивления, т. е. представляют собой, вероятно, проводящую жидкость или жидкую плазму. В случае правильности такой посылки движение больших масс силикатных расплавов к поверхности в магнитном поле Земли может вызвать локальные временные магнитные аномалии над вулканическими аппаратами или внедряющимися интрузивными телами. При соприкосновении же магмы с атмосферой или при прорыве газовых струй в зонах разломов они могут вызвать все те явления, которые мы отметили.

Высказанная гипотеза магмообразования, которую лучше всего было бы назвать «гипотезой газовых струй», изложена в самых общих чертах и требует еще большой и кропотливой работы как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. Публикование ее в таком виде преследует цель привлечь к ней внимание физиков, которые помогли бы дать количественную оценку предлагаемого механизма образования магмы.

Вместе с тем положения гипотезы позволяют, как нам кажется, объяснить многие закономерности магматической деятельности в различных геологических структурах во времени¹. Это, прежде всего, базальтоидный характер магматизма на ранних этапах геосинклинального развития и постепенная смена его все более кислыми и щелочными разностями; появление в платформенных условиях калийсодержащих магм (например трахитов, трахиандезитов) и т. д. Такие закономерности связываются нами с вертикальной миграцией очагов магмообразования по мере роста коры, что вызывает перемещение их из мантии сначала в подкоровые области, а затем непосредственно в кору, а также — с изменением термодинамических условий (параметров p и T), которые являются определяющими в образовании состава газовых струй при дегазации вещества верх-

ней мантии. Так, например, для ионизации, а следовательно, и подвижности натрия необходимы одни значения p и T ; для калия же — величины более низкие. Это приводит к тому, что в начальные этапы развития геосинклиналей, характеризующихся высоким энергетическим уровнем, калий из-за меньшего потенциала ионизации становится более подвижным, чем натрий. При отсутствии или незначительной мощности коры в этот период калий выносятся, и образующиеся магмы имеют преимущественно натриевый характер. По мере роста коры и, следовательно, увеличения на этих участках мантии значений p и T условия для ионизации и подвижности калия становятся еще более благоприятными, что способствует его выносу уже в осадочные породы коры, которые подвергаются калиевому метасоматозу.

Наряду с этим создаются условия, когда наступает и более благоприятная обстановка для ионизации и подвижности натрия, который совместно с калием образует так называемые «сквозьмагматические» или «гранитизирующиеся растворы». В то же время с увеличением мощности коры образуется своеобразный экран, который препятствует удалению калия и натрия в процессе дегазации вещества мантии и способствует концентрации их в подкоровых частях и отложениях коры. В орогенных и устойчивых зонах континентов, где магмы, по-видимому, возникают в основном за счет вещества коры, появляются сперва натриево-калиевые, а затем и существенно калиевые магматические образования. Одновременно происходит и общее обогащение магм щелочами. Вероятно, таким путем можно объяснить также и слюдизацию пород в подкоровых частях по ксенолитам в кимберлитовых трубках. Несомненно, в процессе эволюции от геосинклиналей к платформам на тех уровнях, где зарождаются магматические очаги, с изменением температур и давлений будет меняться характер химических реакций, которые сопровождают образование магматических расплавов и в конечном счете могут влиять на характер дифференциации магмы.

¹ Автор высказывает свое мнение по вопросу, носящему дискуссионный характер (Прим. ред.)