

ПРИРОДА ДВИЖУЩИХ СИЛ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



В. С. Шкодзинский

Многих исследователей поража- ла огромная величина сил геологи- ческих процессов, происходивших на Земле. Под их влиянием колоссаль- ные объёмы твёрдых горных пород текут и сминаются, как тесто, возды- маются высочайшие горные хребты, раскалываются континенты, движут- ся литосферные плиты, и возникают глубочайшие океанические впадины. Природа этих сил долгое время оста- валась непонятной. Интенсивные ис- следования океанов во второй поло- вине прошлого столетия позволили установить их происхождение.

Оказалось, что в океанах суще- ствуют срединно-океанические хреб- ты (рис. 1). Граничащая с ними оке- аническая кора имеет молодой воз- раст, с удалением в обе стороны от них она постепенно удревняется. Это вполне определённо свидетельству- ет, что океаническая кора рождается в срединно-океанических хребтах и по мере образования вытесняется к периферии океанов, погружаясь за- тем в мантию под континенты. Она может формироваться только в ре- зультате всплывания менее плотного мантийного вещества под океанами.

По геофизическим данным [1] на границе мантии и ядра существует скачок температуры на 1000–3000 К (рис. 2). Следовательно, ядро по- догревает мантию, что вызывает разуплотнение и всплывание её разогретого вещества. Толщина мантии приближается к 2900 км. Даже если всплывающее вещество всего на 0,1 г/см³ менее плотное, чем окружающая мантия, то давле- ние, оказываемое поднимающим- ся с такой глубины столбом менее плотного вещества, составляет $2,9 \cdot 10^7$ г/см² = 29 кб. Оно примерно в 13 раз больше давления веса вы- сочайшей на Земле горы Эверест (8848 м). Более высокие горы на на- шей планете не могут существовать, так как основание не выдерживает их веса и «расползается». Поэтому давление всплывающих от границы с ядром струй (плюмов) с избытком хватает для деформаций жёсткой холодной верхней части Земли (ли- тосферы) и перемещений литосфер- ных плит (см. рис. 1).

Мантийная конвекция объясняет огромную величину сил, вызываю- щих геологические процессы. Однако



**Владимир Степанович
Шкодзинский,**

доктор геолого-минералогиче- ских наук, ведущий научный сотрудник Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

На фото сверху – вертикально ориентированные пласты осадочных пород в Андах (<https://cattur.ru/south-america/peru>)

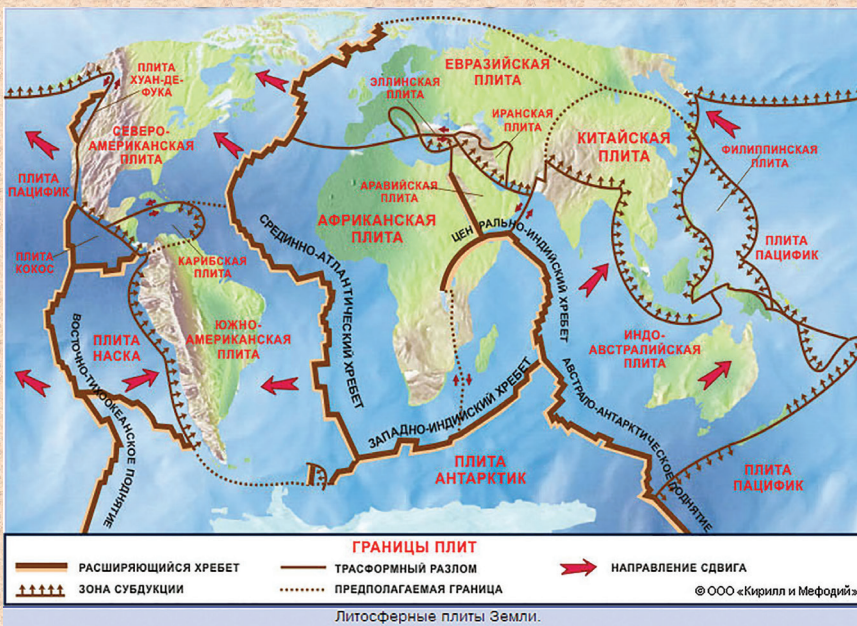


Рис. 1. Срединно-океанические хребты и литосферные плиты Земли (<https://znaniya.com/task/9694866>)

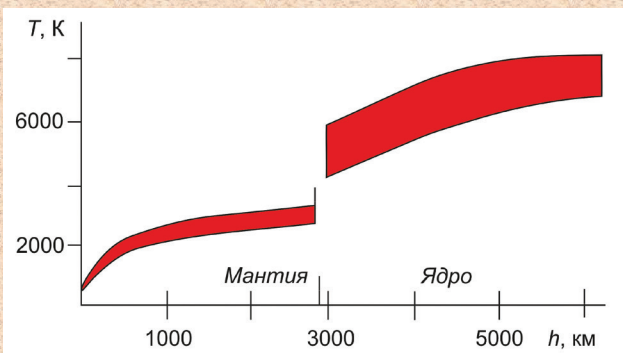


Рис. 2. Скачок температуры на современной границе ядра и мантии [1]

возникает очень трудная проблема выяснения причин, обусловивших намного более высокую температуру ядра по сравнению с мантией. С позиций господствующей в геологической науке гипотезы холодной гомогенной аккреции ядро не может быть заметно горячее мантии. Согласно этой гипотезе Земля образовалась путём объединения смеси относительно холодных железных и силикатных частиц протопланетного диска. Ядро возникло в результате гравитационного разделения этих частиц в земных недрах, поэтому температура их, казалось бы, не должна существенно различаться.

Поскольку с позиций гипотезы холодной гомогенной аккреции невозможно объяснить намного более высокую температуру ядра, высказывались самые невероятные предположения: о существовании процессов плавления мантийного вещества под влиянием гипотетических потоков летучих компонентов из ядра; о присутствии в нём больших содержаний

радиоактивных элементов; об аннигиляции частиц и античастиц тёмной материи, приводящих к его сильному разогреву и др. По наиболее распространённым представлениям [2] железные метеориты являются обломками ядер зарождавшихся планет. Поэтому низкие содержания в них летучих компонентов и радиоактивных элементов, а также отсутствие следов аннигиляции явно свидетельствуют об ошибочности этих предположений.

Следует отметить, что гипотеза холодной гомогенной аккреции была принята О. Ю. Шмидтом [3] для облегчения математических расчётов упрощённой модели образования Земли и не имеет геологических доказательств. Неслучайно поэтому к настоящему времени получены десятки свидетельств её ошибочности и выдвинута модель горячего гетерогенно-

го формирования нашей планеты. В пользу последней модели указывают следующие данные: изменение составов мантийных пород и кристаллической коры соответствует процессам разделения кристаллов и расплава при магматическом фракционировании, уменьшение температуры образования и изотопного возраста их различных пород отвечает последовательности формирования при фракционировании, наиболее древние геотермические градиенты проецируются в область очень высокой температуры (до 1000 °С) на земной поверхности и множество других данных [4]. Значение этих данных ещё не оценено большинством исследователей. Между тем они легко объясняют все особенности мантийной конвекции и решают многие другие генетические проблемы.

Содержание хорошо растворимых в металлическом железе сидерофильных элементов (Ni, Co, Cu, Au и др.) и кислорода в обломках мантийных пород (ксенолитах в магмах) в десятки – тысячи раз больше, чем в случае химической равновесности мантийных пород с металлическим железом ядра [2]. Это вполне определённо указывает, что силикатные и железные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах и, следовательно, выпадали раздельно, т. е. аккреция была гетерогенной [4]. В этом случае ядро должно было образоваться раньше мантии в результате быстрого объединения железных частиц в протопланетном диске под влиянием магнитных сил, поскольку они были в двадцать тысяч раз мощнее гравитационных [5].

Вследствие быстрого образования из крупных тел железа импактный разогрев ядра был очень большим, так как его величина резко возрастает с увеличением размера падающих тел. Это обусловлено сильным сокращением удельных теплотерь на излучение при

падениях крупных тел. По этой причине метеориты обычно полностью сгорают в атмосфере, тогда как крупные приводят к плавлению и даже к частичному испарению пород земной коры. Поэтому горячая гетерогенная аккреция полностью объясняет намного большую температуру земного ядра по сравнению с мантией.

Неизбежное постепенное укрупнение тел в протопланетном диске приводило к сильному росту импактного тепловыделения от ранних стадий аккреции мантии к поздним, вследствие сокращения удельных теплопотерь на излучение при падении крупных импактных тел. К этому же приводило возрастание силы гравитационного притяжения Земли по мере её укрупнения [2]. Величина роста температуры при этом оценивается различными исследователями примерно от 800 до 3000 °С (рис. 3). Из этого следует очень важный вывод о том, что температура в мантии на ранней стадии существования Земли уменьшалась с глубиной, то есть геотермический градиент был обратным по отношению к современному. Следовательно, в это время не было общемантийной конвекции, не поднимались нижнемантийные плюмы и отсутствовали современные геодинамические обстановки.

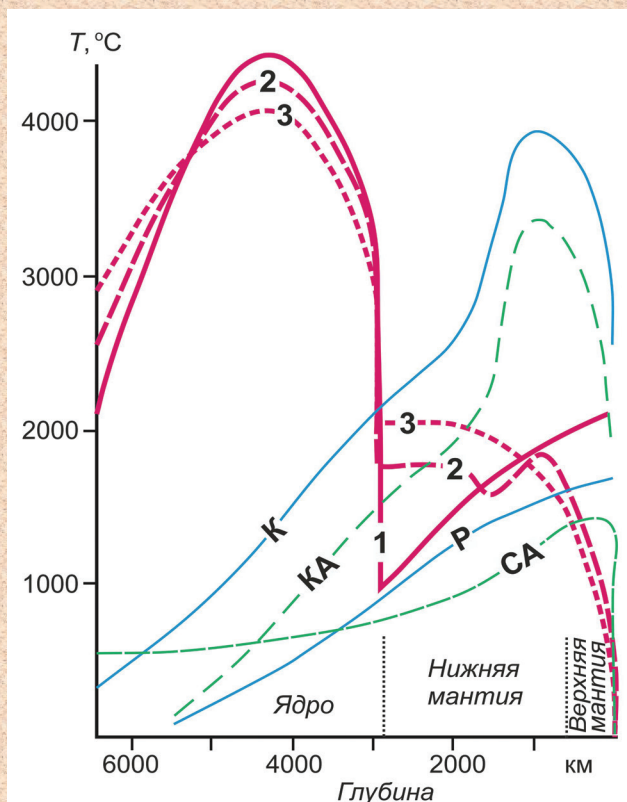


Рис. 3. Эволюция температуры при аккреции Земли по данным В. М. Каулы (КА) и В. С. Сафронова (СА); первичное распределение температуры в земных недрах по данным В. М. Каулы (К) и А. Е. Рингвуда (Р). Распределение по автору: первичное (1), в конце протерозоя (2), в фанерозое (3) [4]

На мантии располагался слоистый глобальный магматический океан глубиной около 140 км, возникший в результате импактного плавления при аккреции. Процессы локальной конвекции в нём приводили к деформациям формировавшейся при его затвердевании пластичной тонкой земной коры. Вследствие небольшой протяжённости возникавших конвективных ячеек (десятки километров) образовавшиеся под их влиянием тектонические структуры были относительно небольшими. Это объясняет протяжённость формировавшихся в это время зеленокаменных поясов и осадочных бассейнов в десятки – сотни километров, тогда как современные океаны и складчатые пояса протягиваются на многие тысячи километров. Пластичность коры обусловила округлые очертания ранних структур. В этот период существовала тектоника малых пластичных коровых плит.

Постепенный прогрев мантии изначально очень горячим ядром должен был привести к возникновению прямого геотермического градиента и мощной всемантийной конвекции. Резкое возрастание 0,6–0,5 млрд лет назад интенсивности тектонических процессов, мощности формировавшихся осадков, количества возникавших богатых магнием глубинных магматических пород (пикритов) и возраст дна современных океанов менее 0,15 млрд лет [6] вполне определённо указывает, что всемантийная конвекция началась примерно полмиллиарда лет назад. Это объясняет максимальную мощность протекания современных геологических процессов.

Интенсивность этих процессов 1,7–0,7 млрд лет назад была самой низкой в истории Земли. Данный период получил название «мертвая Земля» [6], так как к этому времени глобальный магматический океан почти полностью остыл и затвердел, а процессы всемантийной конвекции ещё не начались. С 0,76 по 0,6 млрд лет назад существовало самое крупное оледенение («замерзшая Земля»), когда водоёмы были покрыты льдом даже на экваторе. Очевидно, это было связано с резким сокращением магматической деятельности и выделения из магм углекислоты, что соответственно, вызвало уменьшение связанного с этим «тепличного» эффекта. На планетах земной группы ядра имеют значительно меньший объём, чем земное ядро (на Луне примерно в 1000, на Марсе в 10 раз). Поэтому они не смогли прогреть их мантии, в них не возник прямой геотермический градиент, как на Земле. Это объясняет отсутствие на них ясных признаков проявления плитной тектоники [2], современного магматизма и очень низкие температуры поверхности Марса и Луны.

В период аккреции мантии падение очень крупных тел приводило к образованию импактных углублений на дне магматического океана. Заполнявший их преимущественно основной расплав быстро компрессионно затвердевал, так как он оказывался ниже дна магматического океана. Это обусловило образование тел основных пород среди ультраосновных кумулатов мантии. Такое происхождение имеют многие эглогиты, состоящие из граната и щелочного пироксена. Многочисленные обломки их выносят самые глубинные кимберлитовые магмы.

Судя по величине затопленных базальтами импактных бассейнов на Луне и Меркурии, имеющих иногда диаметр более тысячи километров, объём подобных тел основного состава в мантии может достигать миллионов кубических километров. Плотность их пород в среднем на $0,1 \text{ г/см}^3$ ниже, чем вмещающей ультраосновной мантии [4]. Поэтому они должны всплывать после установления в мантии прямого геотермического градиента. Из этого следует важный вывод о том, что кроме конвекции, связанной с подогревом мантийного вещества ядром, существует конвекция, обусловленная первичной неоднородностью состава мантии.

Эти два типа конвекции (плюмов) существенно различаются по влиянию, оказываемому на литосферу и вызываемому ими магматизму. Разогрев мантии под влиянием ядра относительно мало разуплотнял её вещество (примерно на сотые доли грамма на кубический сантиметр). В соответствии с формулой Стокса скорость всплывания резко возрастает с увеличением размера тел, поэтому слабо разуплотнённое вещество мантии могло всплывать только в виде очень крупных струй. Это объясняет существование в настоящее время огромных суперплюмов диаметром в тысячи километров под Тихим и Атлантическим океанами и Африкой.

Вещество мантии имеет преимущественно очень тугоплавкий богатый магнием ультраосновной состав, поэтому оно относительно слабо подплавлялось (примерно на 1–4 %) под влиянием декомпрессии при подъёме. Вследствие этого главным образом твёрдое вещество ультраосновных суперплюмов имеет очень высокую (порядка 10^{18} Н·с/м^2) вязкость. Поэтому их подъём оказывал огромное механическое воздействие на литосферу, приводил к раскалыванию континентов, раздвижению литосферных плит, образованию океанов и к возникновению тектоники литосферных плит.

Погребённые на дне магматического океана импактные тела основного состава значительно больше отличаются по плотности от ультраосновных пород мантии. Поэтому сложенные ими плюмы в среднем имеют значительно меньший диаметр. Это объясняет широкое распространение относительно небольших (поперечником десятки – сотни километров) плюмов, особенно в океанах. Вследствие большей легкоплавкости их вещество почти полностью переплавлялось под влиянием огромной декомпрессии при подъёме и поэтому имело в триллионы раз меньшую вязкость (десятки Н·с/м^2), чем ультраосновное вещество суперплюмов. По этой причине такие плюмы почти не оказывали механического воздействия на литосферу. Но расплавленное состояние их вещества приводило к быстрому образованию больших объёмов магматических пород. Это объясняет формирование за 1–2 миллиона лет гигантских полей траппов (основных магматических пород) объёмом в миллионы кубических километров и ещё более гран-

диозных скоплений магматических пород, выделяемых под названием «больших магматических провинций».

Связь движений литосферных плит с ультраосновными суперплюмами, а магматизма преимущественно с подъёмом основных плюмов приводит часто к одновременному протеканию этих процессов. Это объясняет существование магматизма «горячих точек». Он обусловлен длительным подъёмом под движущимися плитами относительно стационарных основных плюмов и образованием ими цепочек магматических тел с закономерно уменьшающимся возрастом. Сначала предполагалось, что небольшой размер плюмов, вызывающих образование этих тел, обусловлен очень высокой температурой их вещества, якобы «прожигающего» мантию при подъёме. Однако присутствие в связанных с ними магматических породах кристаллизовавшихся в глубинных условиях крупных кристаллов минералов (вкрапленников) противоречит предположению об аномально высокой температуре их вещества. Всплывание таких плюмов обусловлено не трудно объяснимой очень высокой их температурой, а их основным составом, т. е. лёгким удельным весом относительно вмещающего ультраосновного мантийного субстрата.

Таким образом, новейшие данные о горячей гетерогенной аккреции позволяют объяснить все загадочные особенности мантийной конвекции и связанных с ними геологических процессов на различных стадиях эволюции Земли. Они свидетельствуют, что большая интенсивность протекания современных геологических процессов обусловлена большими размером и температурой её железного ядра. Существует два типа мантийной конвекции. Суперплюмы ультраосновных пород связаны с подогревом мантии горячим ядром и вызывают тектонику литосферных плит. Плюмы основных пород, приводящие к массовому извержению базальтовой магмы, обусловлены неоднородностью состава мантии.

Список литературы

1. Bukowinskii M.S. Taking the core temperature // *Nature*. 1999. N 6792. P. 432–433.
2. Рингвуд, А. Е. Происхождение Земли и Луны / А. Е. Рингвуд. – М. : Недра, 1982. – 293 с.
3. Шмидт, О. Ю. Происхождение Земли и планет / О. Ю. Шмидт. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 132 с.
4. Шкодзинский, В. С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли / В. С. Шкодзинский. – Якутск : Изд-во СВФУ, 2018. – 244 с.
5. Harris P.G., Tozer D.C. Fractionation of iron in the Solar system // *Nature*. 1967. V. 215. P. 1449–1451.
6. Добрецов, Н. Л. Основы тектоники и геодинамики / Н. Л. Добрецов. – Новосибирск : Изд-во НГУ, 2011. – 492 с.