



ПРИРОДА РАЗЛИЧИЙ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

В. С. Шкодзинский



**Владимир Степанович
Шкодзинский,**

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (г. Якутск)

Благодаря успешному развитию науки и техники сбылась многовековая мечта человечества увидеть с близкого расстояния планеты Солнечной системы. В течение второй половины прошлого столетия и после многочисленные космические аппараты достигали поверхности Луны, Марса, Венеры и Меркурия, а также внешних планет и пересылали на Землю многие тысячи удивительно чётких снимков.

Оказалось, что эти планеты существенно отличаются от Земли. Их поверхности покрыты огромным количеством кратеров, наиболее древние и крупные из которых полузатоплены застывшей лавой. На них нет ясных признаков проявления тектоники литосферных плит, которая определяет современный облик нашей планеты. На Марсе присутствуют вулканы намного более крупные, чем на Земле. Поверхность Венеры покрыта огромным количеством относительно молодых вулканических пород. Для выяснения природы этих и других отличий важно было бы детально изучить породы этих планет. Однако для большинства из них это, видимо, будет возможно лишь в далёком будущем. Тем не менее результаты геологического изучения

Земли позволяют во многом понять природу особенностей планет земной группы. Эти результаты впервые позволяют обоснованно решать генетические вопросы планетологии путём анализа фактических данных, а не путём выдвижения противоречивых преимущественно умозрительных предположений.

Новейшие исследования выявили доказательства горячего образования Земли и существования ранней стадии её эволюции глобального океана магмы глубиной около 250 км [1]. Об этом свидетельствуют существование трендов магматического фракционирования (изменения состава расплава при кристаллизации) в мантийных ксенолитах и в раннедокембрийских (древнее 1,6 млрд лет) кристаллических комплексах, уменьшение изотопного возраста и температуры кристаллизации их пород в полном соответствии с последовательностью образования при фракционировании. Ещё более ярко на это указывают проекции линий наиболее древних геотермических градиентов в область очень высокой температуры (до 1000 – 900 °С) на земной поверхности и близость этих градиентов к адиабатическим градиентам для расплавов [2].

На фото сверху – планеты Солнечной системы

Присутствие на Луне преимущественно анортозитовой коры мощностью до 100 км свидетельствует о её формировании в результате всплытия плагиоклаза в магматическом океане глубиной около 1000 км [3]. Из этого следует, что огромные объёмы магм на планетах возникли при их образовании и не связаны с поздними процессами частичного плавления, как обычно предполагается. Такие процессы плавления не могли происходить в значительных масштабах, так как температура планет постепенно понижалась в результате остывания. Об этом убедительно свидетельствует массовое замещение высокотемпературных минералов низкотемпературными в обломках пород мантии (ксенолитах), вынесенных кимберлитовыми магмами.

Магматические океаны Земли и Луны сформировались, главным образом, в результате импактного (от ударов) плавления при аккреции. Поэтому они должны были существовать и на ранней стадии эволюции Меркурия, Венеры и Марса. Однако вследствие традиционного консерватизма исследователей новейшие данные о присутствии таких океанов обычно не учитываются при решении проблем генезиса и эволюции этих планет и Земли. Между тем их учёт даёт принципиально новое полное и убедительное решение большинства генетических проблем.

Вследствие расслоённости по составу и возрастания плотности с глубиной остывание магматических океанов не сопровождалось обширной конвекцией. Поэтому их затвердевание происходило сверху вниз и приводило к возникновению перекрывающих их твёрдых литосфер [1]. Очевидно, что падение последних больших тел протопланетного диска сопровождалось образованием крупных импактных кратеров на формирующихся литосферах, к достижению их дном ещё не затвердевших частей магматических океанов и к частичному затоплению их подстилающей магмой. Это впервые объясняет широкое распространение на Марсе, Меркурии и особенно на Луне полузатопленных лавами древних импактных кратеров (рис. 1) и отсутствие затопленных более молодых кратеров. Сначала предполагалось, что на Луне тёмные участки затопленных базальтами импактных бассейнов являются морями, аналогичными земным. Присутствие, судя по траекториям пролетавших космических аппаратов, под некоторыми из них плотного вещества (масконов), видимо, обусловлено нахождением под ними остатков метеоритов, иногда железных по составу.

Вследствие большого размера и длительного остывания Земли затвердевание верхней части её океана магмы происходило относительно поздно. Поэтому последние крупные тела протопланетного диска во время захватившей все планеты гигантской метеоритной бомбардировки 4,5 – 3,8 млрд лет назад выпадали на ещё покрытую расплавом поверхность, на которой импактные кратеры не могли возникать. Это объясняет казавшееся загадочным отсутствие на Земле следов этой бомбардировки и пород древнее 4 млрд лет [1].

Таким образом, намного более сильная кратерированность поверхности Луны, Меркурия и Марса по

сравнению с Землей обусловлена, в первую очередь, их меньшими размерами и поэтому ранним затвердеванием на них магматических океанов. Степень этой кратерированности обратно коррелируется с размером планет. Она максимальная у небольшой Луны. На ней, судя по возрасту наиболее древних пород преимущественно анортозитовой коры до 4,6 – 4,5 млрд лет, кратеры возникали на самых ранних этапах гигантской метеоритной бомбардировки. Отсутствие на Луне мощной атмосферы способствовало сохранению ранних кратеров.

На Венере установлено существование 300 – 500 млн лет назад грандиозного явления – обновления её поверхности в результате массового излияния лав. Это должно быть обусловлено постепенным уплотнением остывавшей литосферы и снижением плотности подстилавших расплавов магматического океана, вследствие накопления в них расплавофильных (концентрирующихся в расплавах) компонентов (щелочей, летучих, кремнекислоты, глинозёма) в результате процессов фракционирования. По этой причине расплавы становились намного менее плотными, чем литосфера, и частично изливались на её поверхность.

Значительно больший размер Венеры (радиус 6052 км) по сравнению с Марсом (3386 км), Меркурием (2439 км) и Луной (1723 км) обусловил более медленное её остывание, длительное сохранение в ней остатков магматического океана и поэтому позднее проявление на ней процессов затопления расплавами. На Земле такие массовые процессы затопления не происходили, так как верхняя часть её литосферы сложена относительно лёгкой кислой кристаллической корой, которая не могла погружаться в магматический океан. Образование этой коры обусловлено большим масштабом фракционирования магматического океана вследствие большого размера Земли (экваториальный радиус 6371 км).



Рис. 1. Поверхность Луны. Тёмные участки – лунные моря (затопленные лавами импактные кратеры) (<https://ru.wikipedia.org/wiki/Луна>)

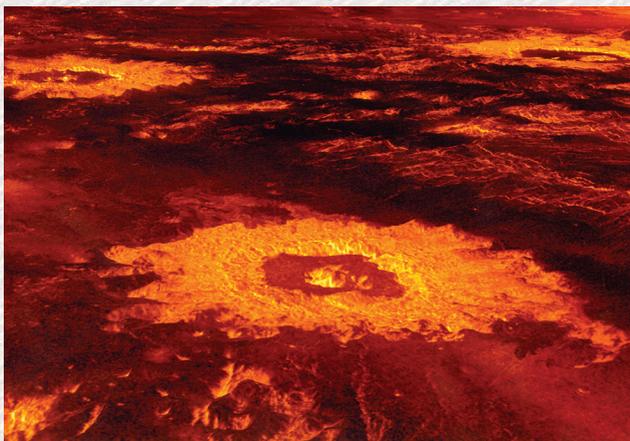


Рис. 2. Венцы – потоки лав вокруг вулканов на Венере
(https://ru.wikipedia.org/wiki/Геология_Венеры)

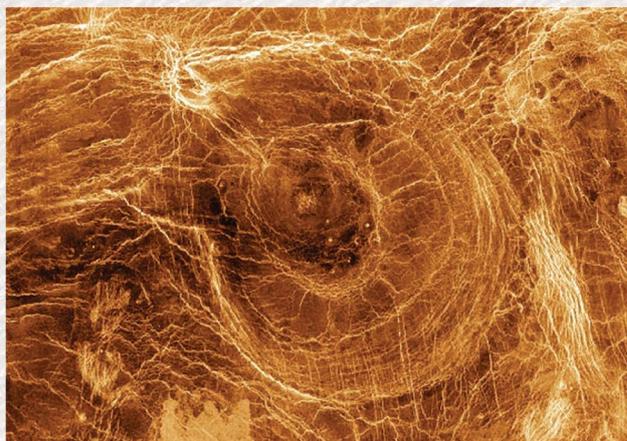


Рис. 3. Арахноид – участок проседания вокруг вулкана на Венере
(https://ru.wikipedia.org/wiki/Геология_Венеры)

Растекание в различные стороны лав из многочисленных вулканов вызвало формирование характерных для Венеры венцов – зубчатых овалов, окаймляющих крупные вулканы (рис. 2). Опускание литосферы на место излившейся лавы объясняет возникновение арахноидов (в переводе – паутина) – сети овальных и радиальных тектонических разломов и деформированных пород вокруг вулканических куполов (рис. 3). Растрескивание застывавших верхних частей текущих лавовых потоков и надвигание друг на друга возникавших плитчатых обломков, видимо, приводило к образованию тессеров – поверхностей, похожих на покрытые черепицей (рис. 4).

Формирование вулкаников из магм огромного всепланетного магматического океана объясняет присутствие на Венере сотен тысяч щитовых вулканов и излияние из них гигантских вулканических потоков длиной до сотен километров. В то же время присутствие на ней современных вулканов не установлено. Массовость и кратковременность вулканизма на Венере, а также невысокие содержания радиоактивных компонентов в земных и лунных породах противоречат предположениям об обусловленности этого вулканизма частичным плавлением в результате постепенного накопления радиогенного тепла в её недрах.

На Марсе поверхность северного полушария примерно на 2 км ниже южного и содержит значительно меньше импактных кратеров. Это свидетельствует о её большей молодости. Литосфера этого полушария на ранней стадии эволюции Марса, видимо, была затоплена расплавами магматического океана вследствие её меньшей мощности и повышенной плотности.

Очевидно, что кристаллизация огромных объёмов магматических океанов должна была сопровождаться выделением из них большого количества летучих компонентов, которые формировали на ранней стадии эволюции планет достаточно плотные атмосферы. Выделение из океана большого количества тепла обусловило относительно высокую температуру

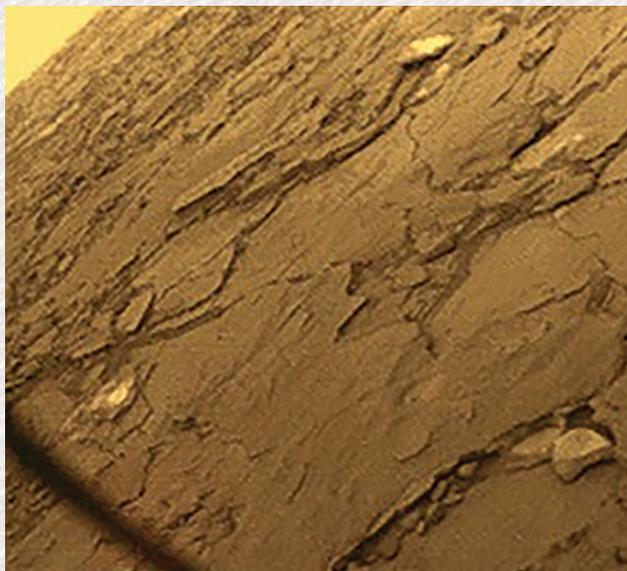


Рис. 4. Тессера – подобная черепице поверхность лавового потока на Венере
(<https://fishki.net/36465-fotografii-planety-venery-14-foto.html>)

атмосфер и существование воды в жидком состоянии. Это впервые объясняет присутствие на Марсе многочисленных русел пересохших рек (рис. 5) и озёр, слоистых пород и гидроокислов железа, сформировавшихся в присутствии воды. Содержанием гидроокислов обусловлен красноватый цвет многих пород и поверхности Марса. Позже, вследствие небольшой силы гравитационного притяжения на Марсе (ускорение силы тяжести $3,771 \text{ м/с}^2$), лёгкие газы постепенно терялись в космическом пространстве, а температура поверхности понижалась. Замёрзшие водоёмы перекрывались слоем пыли, и вода сохранилась только в виде льда в толщах пород, снежных шапок на полюсах и на дне глубоких кратеров. При извержениях вулканов и падениях метеоритов лёд, захороненный



Рис. 5. Пересохшее русло реки на Марсе
(<https://www.alimentarium.org/en/magazine/science/cosmic-vegetables>)



Рис. 6. Овраги на Марсе
(<http://mirtayn.ru/smodelirovannyj-polet-nad-marsom/>)

в толщах пород, таял под влиянием выделявшегося тепла с формированием временных водотоков. Это объясняет существование на Марсе многочисленных каньонов и оврагов (рис. 6).

Сокращение объема при остывании верхней части образовавшейся литосферы приводило к возникновению в ней зон тектонических разрывов. Такие же более поздние процессы сокращения объема в её глубинных частях сопровождались сжатием верхних слоёв и формированием в них надвигов. Это объясняет присутствие на поверхности планет протяжённых рифтоподобных рвов и уступов (рис. 7).

Загадочным на первый взгляд кажется преимущественно основной состав магматических пород на планетах земной группы. На Земле базальты являются самыми распространёнными магматическими породами. Большое их количество обнаружено на Луне. Между тем процессы магмообразования и магматического фракционирования должны приводить к возникновению самых разнообразных по составу расплавов – от пикритовых до андезитовых и риолитовых. Этот парадокс объясняется формированием большинства расплавов при процессах придонного фракционирования синаккреционного магматического океана [1]. Такое фракционирование происходило при компрессионной кристаллизации его придонных частей под влиянием роста давления новообразованных аккрецией верхних слоёв. Состав возникавшего остаточного расплава определялся, в основном, температурой на дне океана, которая отражала скорость накопления выпадавшего вещества. При постоянстве этой скорости состав остаточного расплава также был примерно постоянен. Следовательно, скорость аккреции силикатов на ранних стадиях образования планет земной группы была примерно одинаковой и соответствовала преимущественно основному по составу остаточному расплаву.

Эта выдержанность скорости аккреции силикатного материала на ранних стадиях, видимо, была обусловлена началом формирования планет на одной и той же стадии конденсации протопланетного диска – сразу

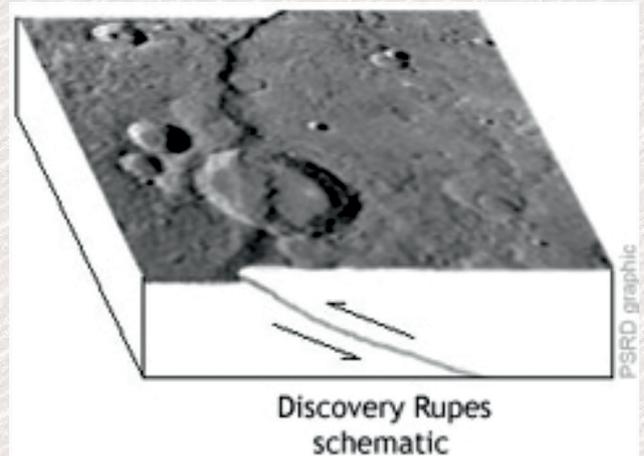


Рис. 7. Уступ Дискавери на поверхности Меркурия высотой 3 км и схема его образования в результате возникновения надвига при процессах сжатия
(<https://ru.wikipedia.org/wiki/меркурий>)

после возникновения в нём металлического железа. Быстрое объединение железных частиц под влиянием магнитных сил [4] привело к формированию сначала железных ядер планет, а затем к нарастанию на них силикатных оболочек под воздействием сил гравитационного притяжения этими ядрами [1]. Это подтверждается присутствием во всех планетах земной группы железных ядер, хотя и очень разного размера.

Для выяснения причины отсутствия на Меркурии, Венере, Марсе и Луне убедительных признаков эволюции геотермических градиентов в их мантиях. Обычно предполагается, что температура в мантии на Земле и на других планетах возрастала с глубиной на всех стадиях их существования. Однако динамика изменения температуры в процессе аккреции противоречит этому предположению. В протопланетном диске происходило постепенное укрупнение его силикатных

частиц вследствие их слипания под влиянием гравитационных и других сил. Поэтому с течением времени на формирующиеся планеты выпадали в среднем всё более крупные силикатные тела. Огромный размер (до тысячи километров и более) импактных бассейнов, возникших на заключительной стадии аккреции Луны (см. рис. 1), подтверждает укрупнение частиц в протопланетном диске.

Величина импактного разогрева резко возрастает с увеличением размера падающих тел вследствие сокращения удельных теплотерь на излучение. По этой причине микрометеориты полностью сгорают в атмосфере Земли, тогда как падение крупных метеоритов приводит к плавлению и частичному испарению пород земной коры. Вследствие этого температура накапливавшегося силикатного материала должна была резко увеличиваться в процессе аккреции. Величину этого возрастания температуры разные исследователи оценивают в 800 – 3500 °С [5].

Из этого следует очень важный вывод о том, что температура в мантии на ранней стадии существования Земли и планет земной группы уменьшалась с глубиной, а не возрастала, как обычно предполагается. В самых верхних частях планет существовали глобальные океаны магмы. Относительно холодный и плотный нижнемантийный материал не мог всплывать в менее плотное и горячее вещество верхних мантий. Поэтому на ранних стадиях эволюции планет земной группы не могли возникать мощные достигающие литосферы мантийные плюмы (всплывающие потоки горячего вещества) и существовать вызываемые ими процессы перемещения литосферных плит. Это противоречит декларативным предположениям о существовании на Земле в раннем докембрии тех же геодинамических обстановок, что и в настоящее время.

В тысячи раз более высокое содержание в земных мантийных породах хорошо растворимых в металлическом железе кислорода и сидерофильных элементов (Ni, Co, Cu, Au и др.), чем в случае химической равновесности вещества мантии с железом [6], однозначно свидетельствует о том, что частицы железа и силикатов никогда не были перемешаны в земных недрах. Следовательно, они выпадали раздельно, и аккреция планет была гетерогенной, а не гомогенной, как обычно предполагается. Расчёты Харриса и Тозера [4] показали, что это было обусловлено в двадцать тысяч раз большей скоростью слипания железных частиц под влиянием магнитных сил, чем силикатных под воздействием гравитационного притяжения. Поэтому железные ядра планет образовались раньше, чем силикатные мантии. Дискуссия о гомогенной или гетерогенной аккреции Земли происходила во второй половине прошлого столетия [7]. Однако в ней не учитывались имеющиеся геологические данные, поэтому наибольшее распространение получили ошибочные упрощённые представления о гомогенной аккреции, то есть о постоянстве состава выпадавшего вещества.

Быстрое слипание в протопланетном диске намагниченных железных частиц привело к аккреции ядер

планет из крупных глыб железа. Вследствие резкого сокращения удельных потерь импактного тепла на излучение при падении крупных тел импактный разогрев и температура железных ядер были намного выше перекрывающих их силикатных мантий. Это объясняет существование скачка температуры на современной границе земного ядра и мантии примерно в 1000 – 2000 °С [8]. Поэтому нижние мантии планет земной группы подогревались изначально горячими ядрами. Верхние же мантии и существовавшие на них магматические океаны охлаждались в результате излучения в космическое пространство. На Земле это привело к инверсии геотермического градиента.

Судя по юрскому возрасту самых древних осадочных пород на дне земных океанов [9], первые океанические области и геодинамические обстановки современного типа на нашей планете появились сотни миллионов лет назад. Следовательно, к этому времени произошла инверсия геотермического градиента. Возраст Земли около 4,56 млрд лет. Поэтому мантийные плюмы и процессы плитной тектоники на ней возникли только на последней стадии её геологической эволюции.

Железные ядра других планет земной группы намного менее массивны, чем ядро Земли. Ядро Луны имеет примерно в 1700 раз меньшую массу, чем земное, Марса – в 10 раз, Меркурия – почти в 7 раз, Венеры – примерно в 1,7 раза. Меньшие массы ядер указывают на меньшую скорость аккреции и на их меньший импактный разогрев. Это согласуется с отсутствием существенных магнитных полей в настоящее время на Луне, Марсе, Меркурии и Венере, указывающее на преимущественно твёрдое состояние их ядер. Очевидно, что небольшие относительно низкотемпературные железные ядра не могли подогреть нижние мантии этих планет до такой степени, чтобы в них появилась мощная тепловая конвекция. Это объясняет отсутствие убедительных признаков существования процессов плитной тектоники на других планетах земной группы, кроме Земли.

На этих планетах отсутствует также современный магматизм, несмотря на мощное проявление его на ранних (Луна) и средних (Венера, Марс, Меркурий) стадиях их эволюции. Этим они кардинально отличаются от Земли, где в океанических и примыкающих к ним областях существуют многие тысячи действующих вулканов. На Земле современный магматизм и процессы плитной тектоники обусловлены подъёмом нижнемантийных плюмов. Очевидно, что отсутствие этого подъёма обусловило отсутствие на планетах земной группы не только плитнотектонических процессов, но современного магматизма.

На этих планетах магматизм обусловлен подъёмом расплавов магматического океана, возникшего в основном в результате импактного тепловыделения при аккреции. На Земле, вследствие очень большого размера горячего ядра, происходит интенсивный разогрев им нижней мантии, подъём в последние сотни миллионов лет из неё плюмов и связанное с ним массовое формирование основных магм в результате декомпрессионного

плавления эклогитов. Последние являются затвердевшими расплавами синаккреционного магматического океана. Отсутствие существенной мантийной конвекции является также причиной практически полного отсутствия современной тектонической активности на других планетах земной группы.

Значительно меньший подогрев ядрами мантий этих планет обусловил их низкую температуру и существование на них в настоящее время очень мощных (многие сотни километров) литосфер. Внедрявшиеся из остатков постааккреционного магматического океана расплавы чаще всего могли формировать относительно небольшое количество каналов в литосфере вследствие её большой мощности. По ним происходило излияние огромного количества расплавов магматического океана. Это объясняет большой размер вулканов на Марсе. Например, самый крупный в Солнечной системе вулкан Олимп (рис. 8) имеет высоту 27 км и диаметр 550 км. Пониженная сила гравитации на Марсе замедляла гравитационное расползание возникавших вулканов и способствовала достижению ими большой высоты.

Гетерогенная аккреция обусловила значительные вариации содержания различных конденсатов протопланетного диска на разных планетах. Она является причиной резко различного размера на них железных ядер и в десятки раз меньшего содержания щелочей в лунных базальтах, чем в одноимённых породах Земли. В базальтах Луны, например, практически нет воды и других летучих компонентов [7]. Эта разница в составе свидетельствует о том, что Луна не возникла из вещества Земли при гипотетическом столкновении её с другой планетой, как иногда предполагается. Она подтверждает представления об её самостоятельной аккреции из частей протопланетного диска, бедного низкотемпературными конденсатами, и о последующем захвате этого спутника гравитационным полем нашей планеты.

Таким образом, результаты детального изучения происхождения Земли позволяют понять природу многих особенностей планет земной группы. Большинство этих особенностей обусловлено образованием планет путём горячей гетерогенной аккреции и существованием на них глобальных океанов магмы. Данные по планетам земной группы позволяют лучше понять природу геологических процессов на Земле.



Рис. 8. Вулкан Олимп на Марсе
([https://ru.wikipedia.org/wiki/Олимп_\(Марс\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Олимп_(Марс)))

Список литературы

1. Шкодзинский, В. С. *Петрология литосферы и кимберлитов* / В. С. Шкодзинский. – Якутск : Изд-во СВФУ, 2014. – 452 с.
2. Шкодзинский, В. С. *Ранняя история Земли – мифы и факты* / В. С. Шкодзинский // *Наука и техника в Якутии*. – 2016. – № 2 (31). – С. 1–6.
3. Snyder G.A., Borg L.E., Nyquist L.E., Taylor L.A. *Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution // The origin of the Earth and Moon. Univ. of Ariz. Press. 2000. P. 361-395.*
4. Harris P.G., Tozer D.C. *Fractionation of iron in the Solar system // Nature. 1967. V. 215. N 5109. P. 1449-1451.*
5. Федорин, Я. В. *Модель эволюции ранней Земли* / Я. В. Федорин. – Киев : Наукова думка, 1991. – 112 с.
6. Рингвуд, А. Е. *Происхождение Земли и Луны* / А. Е. Рингвуд. – М. : Недра, 1982. – 294 с.
7. Флоренский, К. П. *Очерки сравнительной планетологии* / К. П. Флоренский, А. Т. Базилевский, Г. А. Бурба [и др.]. – М. : Наука, 1981. – 326 с.
8. Bukowinski M.S. *Taking the core temperature // Nature. 1999. N 6572. P. 432-433.*
9. Салоп, Л. Н. *Геологическое развитие Земли в докембрии* / Л. Н. Салоп. – Л. : Недра, 1982. – 334 с.

АРХИВ МУДРЫХ МЫСЛЕЙ

Надо стремиться к умению мыслить, а не к многознанию. Найти одно научное доказательство для меня важнее, чем овладеть персидским царством.

Демокрит

Знания, не рождённые опытом, матерью всякой достоверности, бесплодны и полны ошибок.

Леонардо да Винчи