

Московский Государственный Университет
Имени М.В. Ломоносова
Геологический факультет
Кафедра динамической геологии

Тектоника плит в астрономических объектах
Солнечной системы

Курсовая работа студента 1-го курса
Толстой Анастасии Ильиничны
Научный руководитель
Аспирант 3 г.о. Завьялов Сергей Петрович

Москва, 2017

Оглавление

Введение.....	3
1 глава. Тектоника плит. Основные положения тектоники плит.....	5
1.1. Движущие силы.....	6
1.2. Виды взаимодействия плит. Структурно-геологическое строение границных зон между плитами.....	9
1.3. Сейсмичность на границных зонах	11
Глава 2. Солнечная система	13
2.1. Строение Солнечной системы	13
2.2. Планеты земной группы	13
Глава 3. Тектоника плит за пределами Земли	16
3.1. Условия для возникновения тектоники плит на астрономическом объекте	16
3.2. Обзор астрономических объектов Солнечной системы с позиции тектоники плит	22
3.2.1. Меркурий	22
3.2.2 Венера.....	22
3.2.3 Марс.....	22
3.2.4 Европа	23
Заключение	27
Список использованной литературы.....	28

Введение

Тектоника плит, пришедшая на смену геосинклинальной концепции, глубоко изменила наши представления о строении Земли и происходящих в ней процессах. Тектоника плит – геодинамическая концепция, основанная на предположении крупномасштабных горизонтальных перемещениях фрагментов верхней оболочки твердой Земли. Этот процесс выполняет важнейшие задачи на нашей планете, такие, например, как углеродный цикл. Плитная тектоника явилась более убедительной концепцией, чем предшествовавшие ей, так как оказалась способной объяснить процессы наблюдениями.

На сегодняшний день вопрос существования тектоники плит на других планетах является одним из наиболее актуальных. Тема является важной, потому что вопрос о том, как зародилась тектоника плит даже на Земле, является пока нерешенным. Нет единого мнения о физических, химических, геометрических и прочих условиях, при которых геодинамика планеты может порождать тектонику плит. Этим подкрепляется сложность и актуальность данного вопроса. Поэтому изучение других планет на предмет тектоники плит кажутся ещё более затруднительными. Однако, возможно, исследуя другие планеты на данную тему, мы сможем улучшить или дополнить наши представления о тектонике плит на Земле.

На сегодняшний день явление тектоники плит достоверно установлено только на Земле. Однако данные спутниковых наблюдений позволяют делать предположения, что тектоника плит может иметь место и на других небесных телах Солнечной системы, проявляясь иногда совершенно в другом виде. Тектоника плит отвечает за многие природные явления на астрономическом объекте, а также может являться одним из непосредственных условий зарождения жизни.

Целью данной работы является изучение условий возникновения тектонических движений поверхности в астрономическом объекте и рассмотрение возможности их существования на объектах Солнечной системы.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Ознакомление с теорией тектоники плит.
2. Поиск, анализ и обзор современной научной литературы, включающей в себя исследования механизмов образования тектонических подвижек на планете.
3. Рассмотрение возможности существования тектонических движений на астрономических объектах Солнечной системы на основе изученной литературы.

Данная работа состоит из 3 глав. В первой главе излагаются основные положения тектоники плит. Рассмотрены виды взаимодействий плит, структурно-геологическое строение граничных зон между плитами, также сейсмичность на граничных зонах. Во второй главе представлено описание Солнечной системы и

дан краткий обзор строения и геологии планет земной группы. В третьей главе рассматриваются существующие представления об условиях зарождения тектоники плит на планетах и спутниках, и на их основе проводится анализ астрономических объектов на предмет мобилизма.

1 глава. Тектоника плит. Основные положения тектоники плит

Тектоника плит рассматривает движения и взаимодействия литосферных плит. Впервые предположение о горизонтальном движении блоков коры было высказано Альфредом Вегенером в 1920-х годах в рамках гипотезы «дрейфа континентов», но поддержки эта гипотеза в то время не получила. Лишь в 1960-х годах исследования дна океанов дали неоспоримые доказательства горизонтальных движений плит и процессов расширения (спрединга) океанов за счёт формирования океанической коры. Теорию спрединга морского дна, которая непосредственно является основанием тектоники плит, Артур Холмс предложил в 1929 году. Основные положения тектоники плит были сформулированы в 1967-68 г. группой американских геофизиков - У. Дж. Морганом, К. Ле Пишоном, Т. Уилсоном в развитие более ранних (1961-62) идей американских учёных Г. Хесса и Р. Дигца о расширении ложа океанов. [Короновский, 2002]

Основные положения тектоники плит можно свести к нескольким основополагающим:

1. Верхняя часть планеты разделена на две оболочки, существенно различающиеся по реологическим свойствам: жесткую и хрупкую литосферу и подстилающую её пластичную и подвижную астеносферу.

В тектонике плит мантия подразделена на два слоя с различными механическими свойствами. Литосфера состоит из жесткого верхнего слоя мантии и вышележащей жесткой коры. Под литосферой располагается относительно мягкий, легко деформируемый мантийный слой, называемый астеносферой. Мощность литосферы под океаническими бассейнами достигает приблизительно 80 -100 км, а под континентальными примерно вдвое больше. Температура внутри Земли возрастает с глубиной и на границе литосфера-астеносфера составляет около 1300 °С. В пределах континентов происходит линейный градиент роста температуры, в океане же температурное распределение описывается так называемой функцией ошибок (erfc) [Тёркот и др., Геодинамика, 1985].

2. Литосфера разделена на плиты, постоянно движущиеся по поверхности пластичной астеносферы.

Она делится на 7 крупных плит, десятки средних плит и множество мелких.

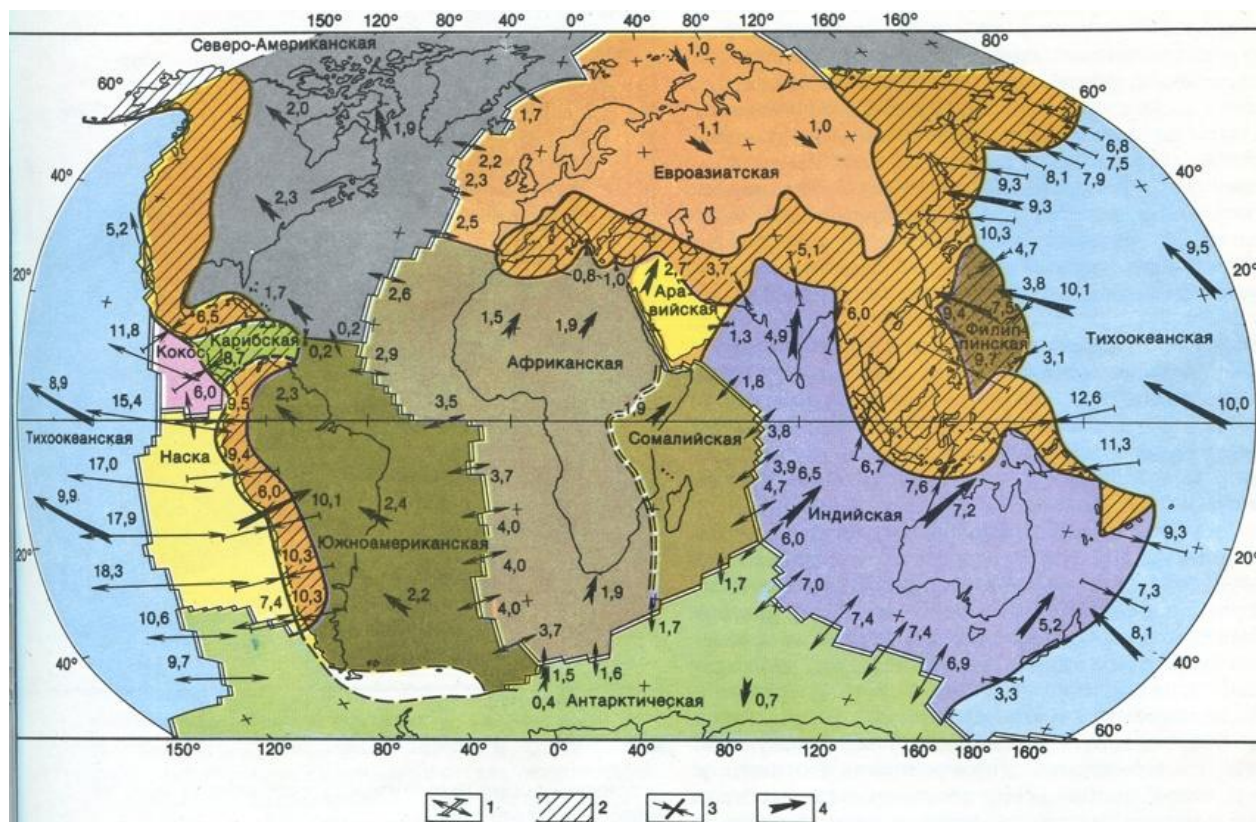


Рис. 1. Положение литосферных плит. (<http://www.oldbooks.matrixboard.ru/index1983-021.htm>)

3. Различают три типа относительных перемещений плит: расхождение (дивергенция), схождение (конвергенция) и сдвиговые перемещения.

Соответственно, выделяются и три типа основных границ плит: дивергентные, конвергентные и трансформные границы. (Глава 1, п. 1.2)

4. Объём поглощённой в зонах субдукции океанской коры равен объёму коры, возникающей в зонах спрединга.

Это положение подчёркивает мнение о постоянстве объёма Земли. Но такое мнение не является единственным и окончательно доказанным. Не исключено, что объём планеты меняется пульсационно, или происходит его уменьшение за счёт охлаждения.

5. Одной из причин движения плит является мантийная конвекция, обусловленная мантийными теплогравитационными течениями. (Глава 1, п. 1.1)

6. Перемещения плит подчиняются законам сферической геометрии и могут быть описаны на основе теоремы Эйлера.

1.1. Движущие силы

Так называемый движущий механизм должен энергетически обеспечить процессы землетрясений, вулканических извержений и горообразования. Единственным источником, достаточным для поддержания этих процессов, является внутреннее тепло Земли. Оно генерируется в результате радиоактивного распада изотопов урана, тория и калия, а также в процессе общего остывания Земли. Превращение теплового потока в направленное движение может осуществляться благодаря конвекции — теплогравитационных течений.

Источником энергии для этих течений служит разность температуры центральных областей Земли и температуры близповерхностных её частей. Под действием сил плавучести холодная жидкость будет погружаться и замещаться горячей жидкостью, поднимающейся на ее место. При этом возникает упорядоченная циркуляция, при определенных условиях принимающая форму двумерных конвективных ячеек. При этом в верхней части ячейки течение вещества происходит почти в горизонтальной плоскости, и именно эта часть течения определяет горизонтальное перемещение вещества астеносферы и расположенных на ней плит. В целом, восходящие ветви конвективных ячеек располагаются под зонами дивергентных границ (СОХ и континентальными рифтами), нисходящие – под зонами конвергентных границ.

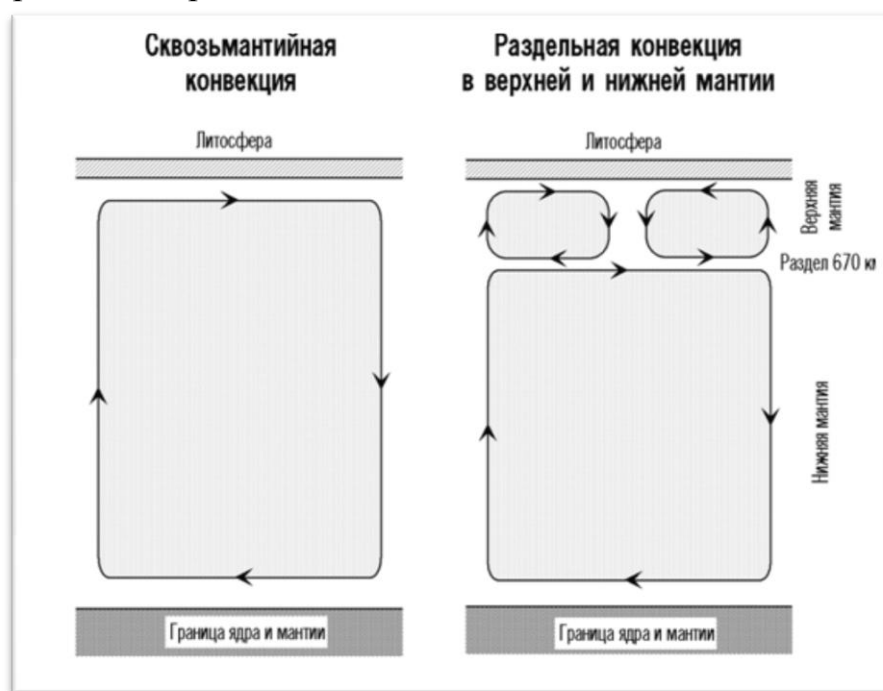


Рис. 2. Мантийная конвекция. (<http://ppt-online.org/46626>)

Как было сказано, основным движущим механизмом литосферных плит принято считать мантийную конвекцию. Однако помимо нее оказывают воздействия и другие силы, носящие второстепенный характер.

Сила вязкого сцепления с мантией (сила мантийного волочения)

Поверхностная сила, действующая на нижней поверхности плиты и обусловленная вязким трением на границе плиты и астеносферы. Величина этой силы пропорциональна площади плиты и ее скорости относительно астеносферы.

Сила отталкивания от хребта

Эта сила определяется как отнесенная к единице длины хребта эффективная сила, отталкивающая от него плиты. Источником ее является потенциальная энергия силы тяжести, обусловленная превышением хребтов над абиссальными равнинами. Силы отталкивания максимальны вблизи гребня и минимальны в местах, где поднятия переходят в абиссальные равнины.

Сила субдукционного затягивания

Это сила возникает за счет того, что участвующие в субдукции блоки являются более плотными, чем астеносфера, и поэтому тонут в ней. Эта сила возникает вследствие перепада плотности между погружающимся блоком и окружающей его астеносферой.

Сила субдукционного сцепления

Эта сила в отличие от силы субдукционного затягивания зависит от скорости схождения плит и возникает за счет вязкого трения блока, погружающегося в мантию.

Сила сопротивления трансформного разлома

Сейсмическая активность на трансформных разломах свидетельствует о том, что смещение плит друг относительно друга сопровождается трением, которое создает силу сопротивления движению. Эта сила не зависит от относительной скорости плит по обе стороны от разлома.

Сила сопротивления при столкновении

Неглубокая сейсмическая активность в зонах схождения плит свидетельствует о том, что процессу сближения плит противодействует сила трения между ними. Она также не зависит от скорости схождения плит. [Теркот и др., Геодинамика, 1985.]

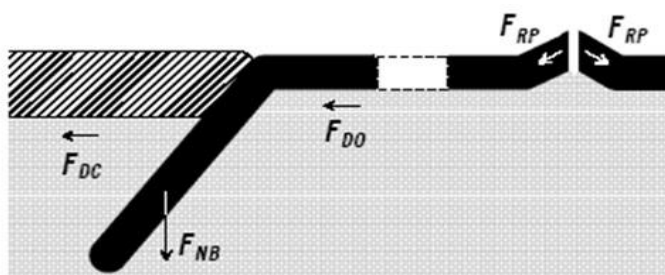


Рис. 3. Движущие силы. (<http://ppt-online.org/46626>)

1.2. Виды взаимодействия плит. Структурно-геологическое строение граничных зон между плитами

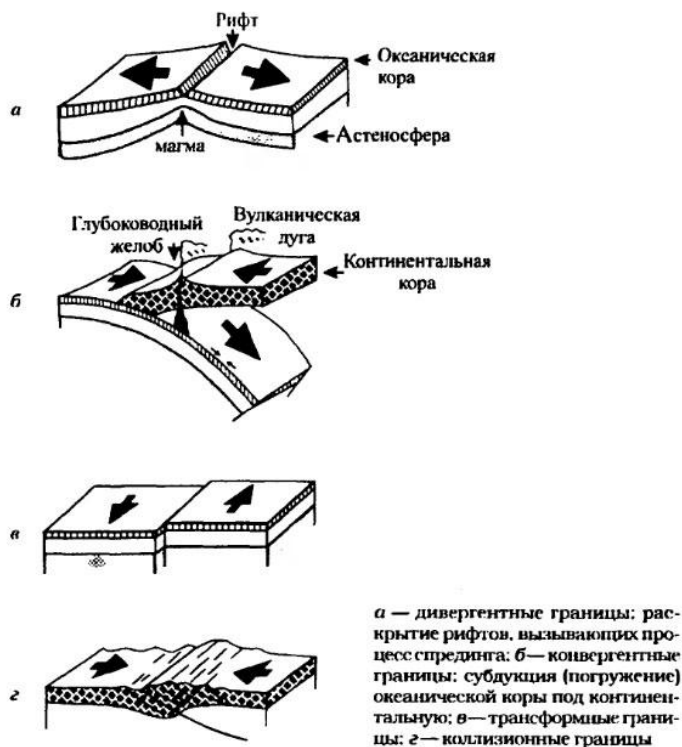


Рис. 4. Виды взаимодействия плит. (<http://www.intuit.ru/studies/courses/3475/717/lecture/21325?page=5>)

Различают три типа относительных перемещений плит: расхождение (дивергенция), схождение (конвергенция) и сдвиговые перемещения. Соответственно, выделяются и три типа основных границ плит:

Дивергентные границы – границы, вдоль которых происходит раздвижение плит. Эти границы приурочены к континентальным рифтам и СОХ.

Конвергентные границы – границы, вдоль которых происходит столкновение плит. Главных вариантов взаимодействия при столкновении может быть три: «океаническая – океаническая», «океаническая – континентальная» и «континентальная – континентальная» плиты. В зависимости от характера сталкивающихся плит, может протекать несколько различных процессов.

Субдукция – процесс поддвига океанской плиты под континентальную или другую океаническую. Зоны субдукции приурочены к осевым частям глубоководных желобов, сопряжённых с островными. На субдукционные границы приходится около 80% протяжённости всех конвергентных границ.

При столкновении континентальной и океанической плит естественным явлением является подвиг океанической (более тяжёлой) под край континентальной; при столкновении двух океанических погружается более древняя (то есть более остывшая и плотная) из них.

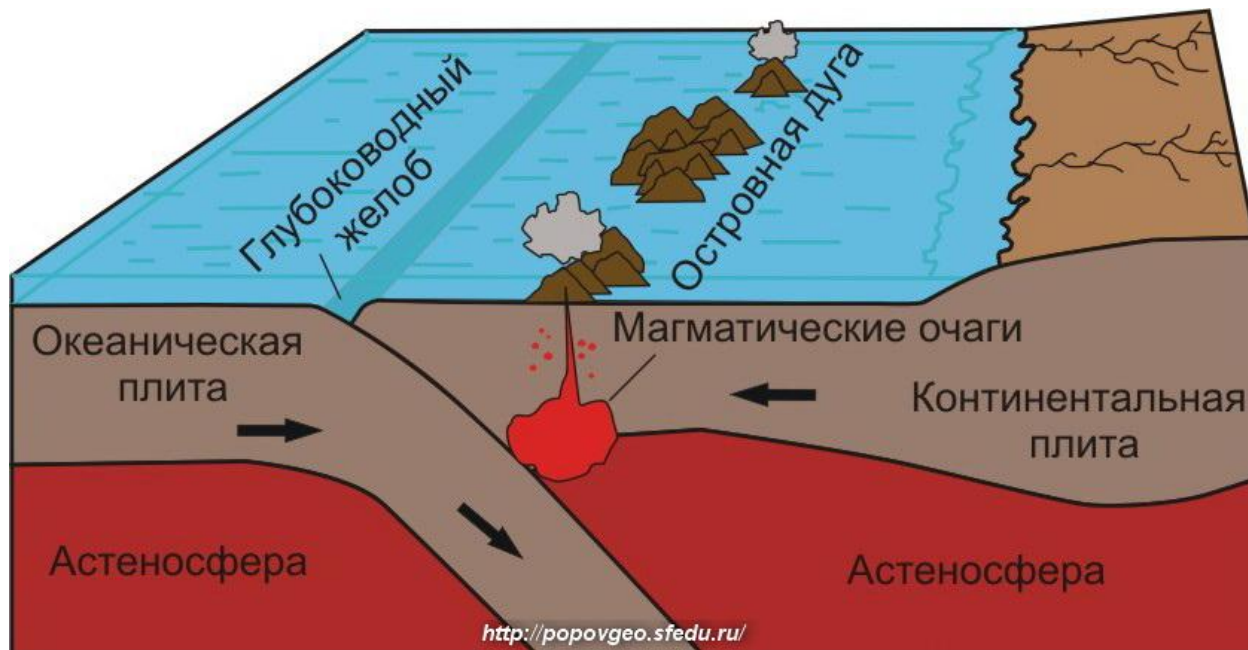


Рис. 5. Субдукция. (<http://popovgeo.sfedu.ru/>)

Погружение субдуцирующей плиты в мантию трассируется очагами землетрясений, возникающих на контакте плит и внутри субдуцирующей плиты (более холодной и вследствие этого более хрупкой, чем окружающие мантийные породы). Активные окраины имеют гораздо более сложное строение и испытывают более сложное развитие, чем пассивные. Активные окраины характеризуются наличием активнодействующей сейсмофокальной зоны.

Значительно более редким процессом взаимодействия континентальной и океанской плит служит процесс обдукции – надвигания части океанической литосферы на край континентальной плиты. В ходе этого процесса происходит расслоение океанской плиты, и надвигается лишь её верхняя часть – кора и несколько километров верхней мантии.

При столкновении континентальных плит, кора которых более лёгкая, чем вещество мантии, и вследствие этого не способна в неё погрузиться, протекает процесс коллизии. В ходе коллизии края сталкивающихся континентальных плит дробятся, сминаются, формируются системы крупных надвигов, что приводит к росту горных сооружений со сложным складчато-надвиговым строением. Примером такого процесса служит столкновение Индостанской плиты с Евразийской, сопровождающееся ростом грандиозных горных систем Гималаев и Тибета.

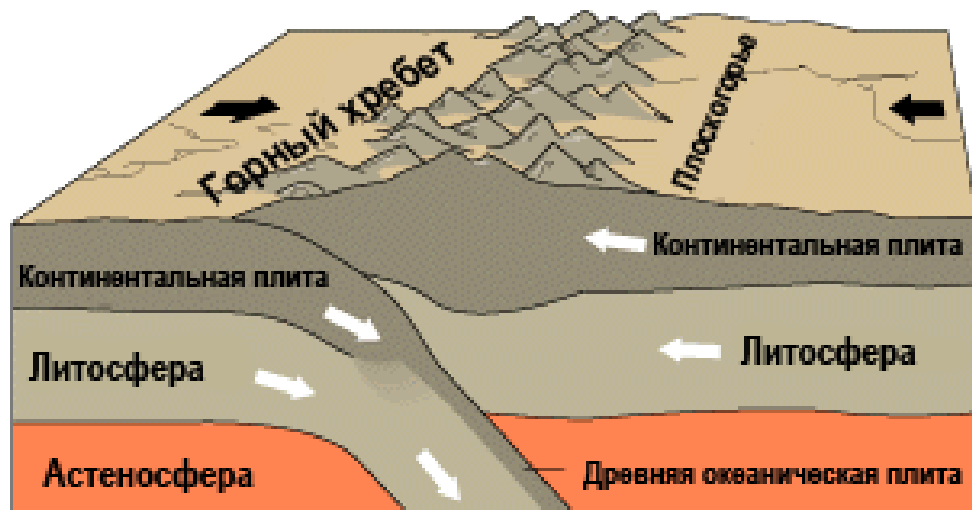


Рис. 6. Коллизия. (<https://ru.wikipedia.org/>)

Трансформные границы – границы, вдоль которых происходят сдвиговые смещения плит. Пример может служить трансформный разлом Сан-Андреас, возникший между тихоокеанской и североамериканской плитами.



Рис. 7. Аэроснимок разлома Сан-Андреас. (<https://wikimedia.org/>)

1.3. Сейсмичность на граничных зонах

Внутренние области плит характеризуются слабой проявленностью эндогенных процессов. А границы плит являются областями сейсмической, тектонической и магматической активности. Расположение очагов землетрясений, так же как и вулканов, сильно коррелирует с границами плит. Землетрясения происходят на всех типах границ между литосферными плитами, однако очень сильные землетрясения происходят чаще всего в зонах субдукции и в областях столкновений континентов. Бывают сильные землетрясения и вдали от границ плит, но очень редко. Высокая сейсмичность может быть объяснена тем, что краевые зоны плит испытывают большие напряжения, так как перемещаются относительно друг друга.

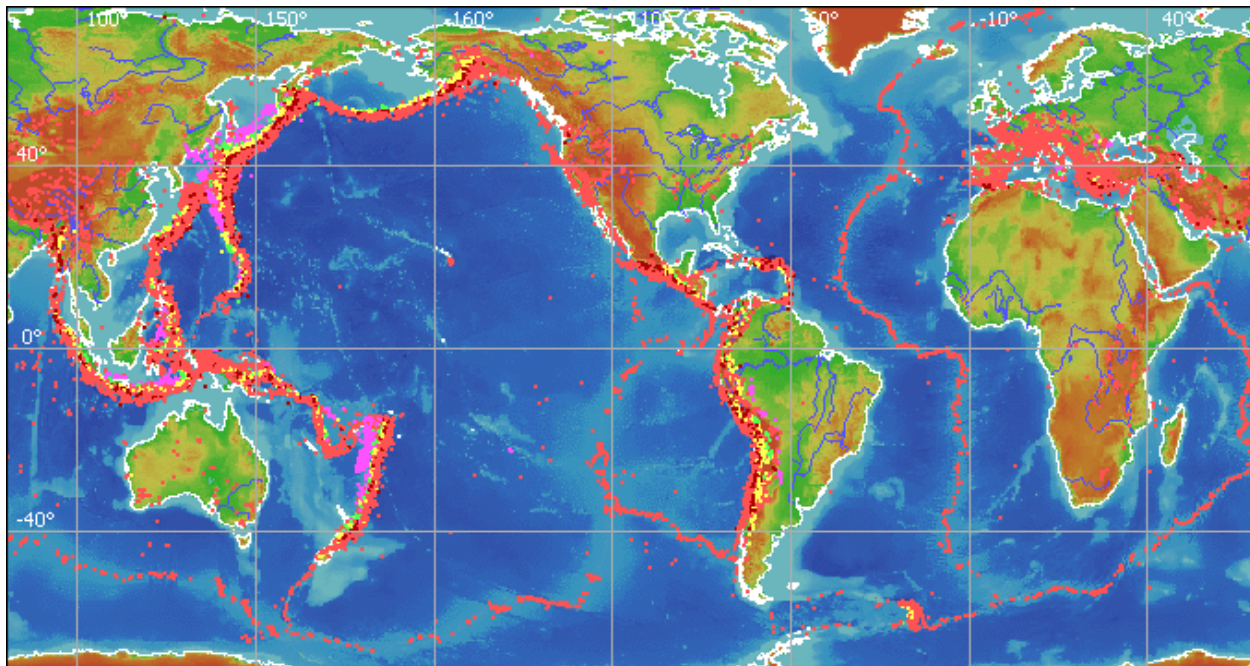


Рис. 8. Распределение землетрясений. (http://tsun.sccc.ru/tsulab/H_School/p3_1.htm)

Глава 2. Солнечная система

2.1. Строение Солнечной системы

Солнечная система состоит из восьми планет: четырех внутренних, так называемых планет земной группы и планет внешней группы – газовых гигантов. Между этими группами находится пояс астероидов. Сразу за газовыми гигантами располагается кольцо с огромным количеством материи в виде ядер комет с массой равной 10^4 массы Солнца. Это внутреннее облако Оорта. Далее находится собственно облако Оорта. Радиус в $5 \cdot 10^4$ определяет современную границу Солнечной системы.

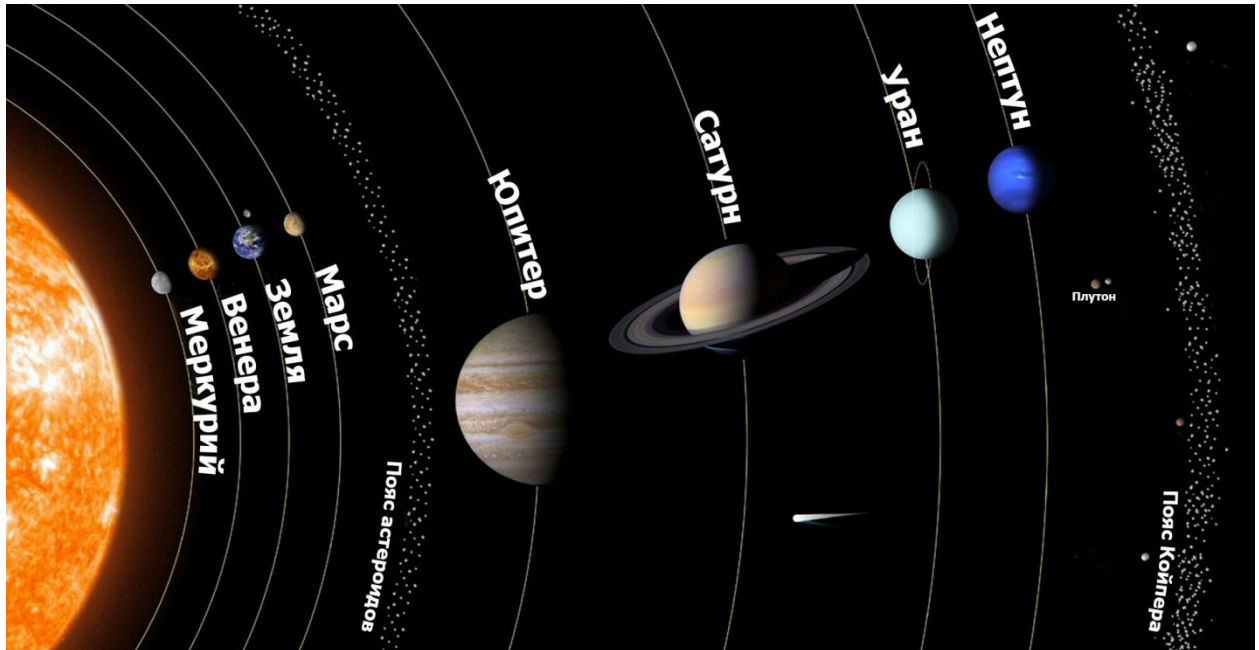


Рис. 9. Строение Солнечной системы. (<http://light-science.ru/solnechnaya-sistema.html>)

К планетам земной группы относятся Земля, Меркурий, Венера и Марс. Все они состоят в основном из силикатов и металлов.

Внешние планеты – это Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. В состав газовых гигантов входят главным образом водород и гелий.

2.2. Планеты земной группы

Меркурий – одна из самых маленьких безатмосферных планет, с диаметром, составляющим примерно 40 процентов земного. Исходя из большой плотности Меркурия (5400 кг/м^3), которая почти равна плотности Земли, можно сделать вывод о наличии у Меркурия большого железного ядра, покрытого 500-600 километровым слоем силикатных пород. На поверхности этой планеты имеются сильно кратерированные участки. Значительные площади занимает гладкая поверхность и ряд кольцевых бассейнов, по-видимому, имеющих ударное происхождение.

Венера считается схожей с Землей по массе и размерам, поэтому есть предположение, что у нее есть металлическое ядро, аналогичное земному. Однако, как показали магнитные измерения, собственного глобального магнитного поля у планеты нет. Давление атмосферы на поверхности очень велико и температура

достигает +500 градусов по Цельсию. Поверхность Венеры на 90% покрыта базальтовой лавой.

Земля состоит из ядра, мантии и земной коры. Основное ядро Земли, делится на внутреннее твердое ядро, радиусом 1300 км, и внешнее жидкое - 2200 км. Температура в центре ядра доходит до 5960 ± 500 °С. Мантия простирается на глубине 2900 км и составляет 83% объема Земли и 67% общей массы. Она состоит из двух частей: внешней и внутренней. Литосфера обычно протяженность около 100 км. Земная кора неравномерной толщины: около 50 км на континентах и около 10 км под океанами.

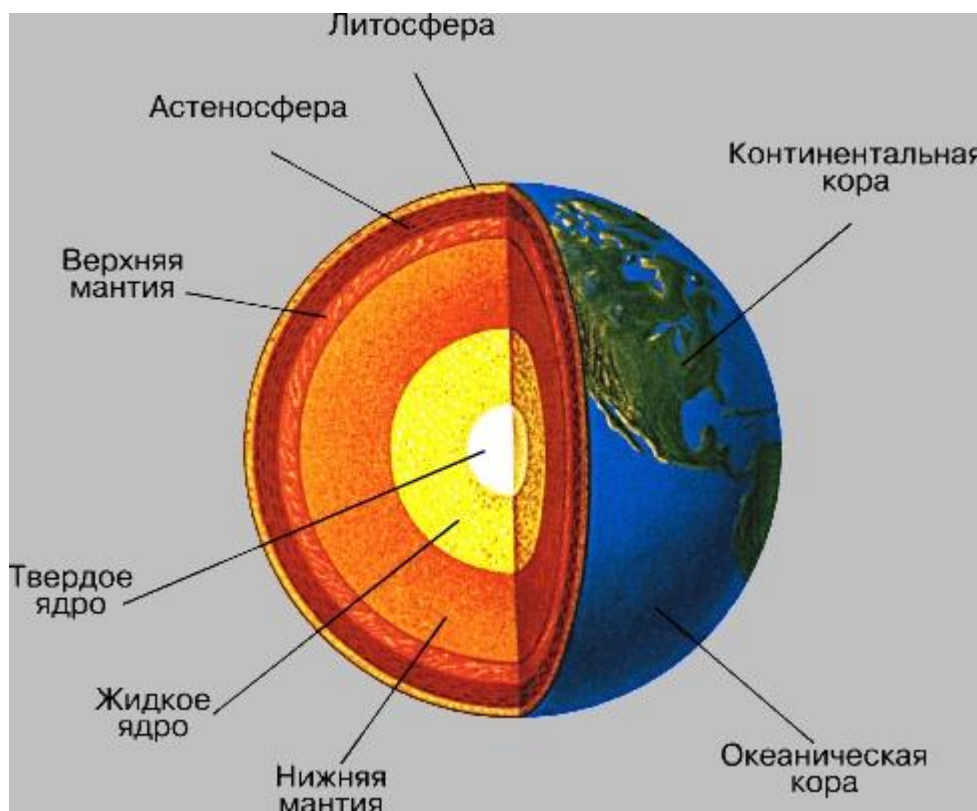


Рисунок 10. Земля в разрезе. (<https://geographyofrussia.com/stroenie-zemli/>)

Магнитное поле Земли возникает за счет взаимодействия вращения вокруг собственной оси, с жидким ядром внутри планеты. Атмосферу удерживает сила земной гравитации. Она имеет несколько слоев: тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера и экзосфера.

Марс – четвертая по счету планета от Солнца, намного меньше Земли, ее радиус составляет 0,53 земных. На Марсе существует весьма разреженная углекислая атмосфера с давлением у поверхности $0,03-0,1$ кг/см². Такое низкое давление не позволяет существовать воде. Поверхность Марса подразделяется на базальтовые равнины в северном полушарии и возвышенности – в южном, где распространены большие ударные кратеры. На Марсе находится самый большой вулкан в Солнечной системе – Олимп, его высота достигает 21 км. Большой интерес представляют явные следы флювиальной деятельности в виде сухих

речных русел на поверхности. У Марса отсутствует жидкое ядро, так как его магнитное поле чрезвычайно слабое.

Глава 3. Тектоника плит за пределами Земли

3.1. Условия для возникновения тектоники плит на астрономическом объекте

На сегодняшний день еще не до конца известно, какие условия необходимы для того, чтобы на планете образовалась тектоника плит. Но существует ряд точек зрения, в которых предложены условия её образования.

Чтобы поверхность планеты была подвижной, необходимо чтобы она была не цельной, а разбитой на блоки. Помимо этого, чтобы блоки могли перемещаться, часть из них должна погружаться под другие. Т.е. должен иметь место процесс субдукции. Таким образом, двумя главными вопросами происхождения тектоники плит являются возникновение разрывных границ в литосфере, которые нарушили ее цельность и причина, по которой сформированные блоки могли субдуцировать. В настоящий момент существует несколько моделей, иллюстрирующих эти процессы.

Согласно [Bercovici, Ricard, 2014] области пониженных давлений в литосфере могут приводить к образованию протосубдукции и формированию начального тектонического блока. Его концепцию можно представить в несколько стадий:

1. Цельная литосфера;
2. Нисходящие движения (погружения) отдельных областей поверхности (литосферы) вследствие неоднородности давления;
3. Ослабление (прочности) этих областей, разрыв сплошности. Протосубдукция;
4. Распространение разрывов, формирование начального тектонического блока.

Как было выше упомянуто, определяющим условием образования тектоники плит является появление разрывов в литосфере, т.е. разрушение. Ученые предлагают несколько механизмов образования областей пониженной прочности:

1. Образование микротрещин.
2. Уменьшение размера зерен породы в литосфере.

Скорость разрушения принято характеризовать так называемым числом разрушения (damage number). А скорость увеличения размера зёрен называется числом восстановления (healing number). Чтобы тектоника плит могла иметь место, важно чтобы число разрушения было выше числа восстановления.

Согласно расчетам [Bercovici, Ricard, 2014] одной области пониженного давления достаточно для того, чтобы начал формироваться тектонический блок. Эта область погружается вглубь и провоцирует образование других участков с пониженным давлением. Они начинают распространяться, формируя ослабленные зоны, т.е. первичные границы тектонического блока. В конечном счёте

формируется замкнутый тектонический блок,двигаемый одной субдукцией.
(рис. 11)

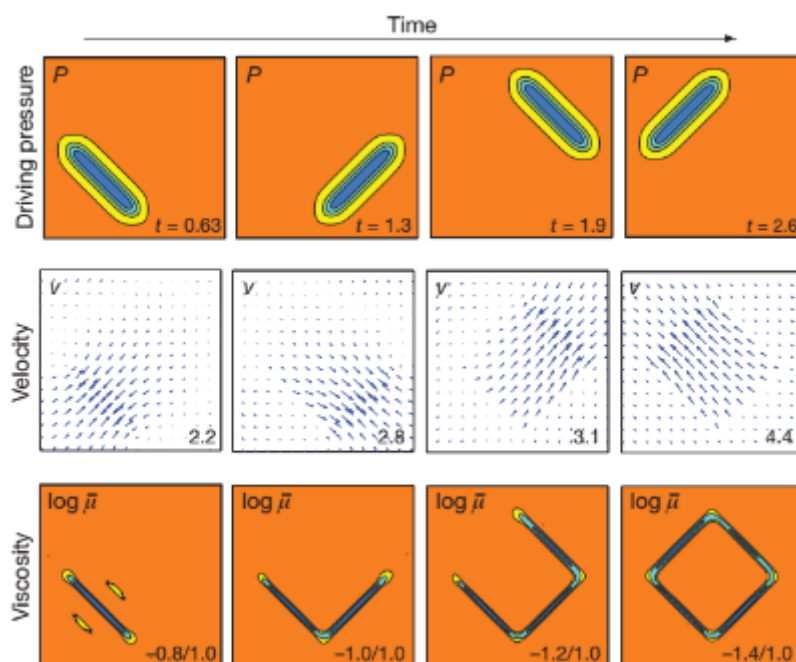


Рис. 11. Изменение давления, скорости и вязкости моделируемой области на поверхности Земли в архейских условиях. (Bercovici, 2014)

На Венере такой процесс невыполним, так как замкнутый контур из ослабленных зон не успевает сформироваться из-за высокой температуры на поверхности. Ее большое значение увеличивает число восстановления литосферы и уменьшает ее число разрушения: ослабленные зоны «залечиваются» быстрее, чем формируются новые. (Рис. 12).

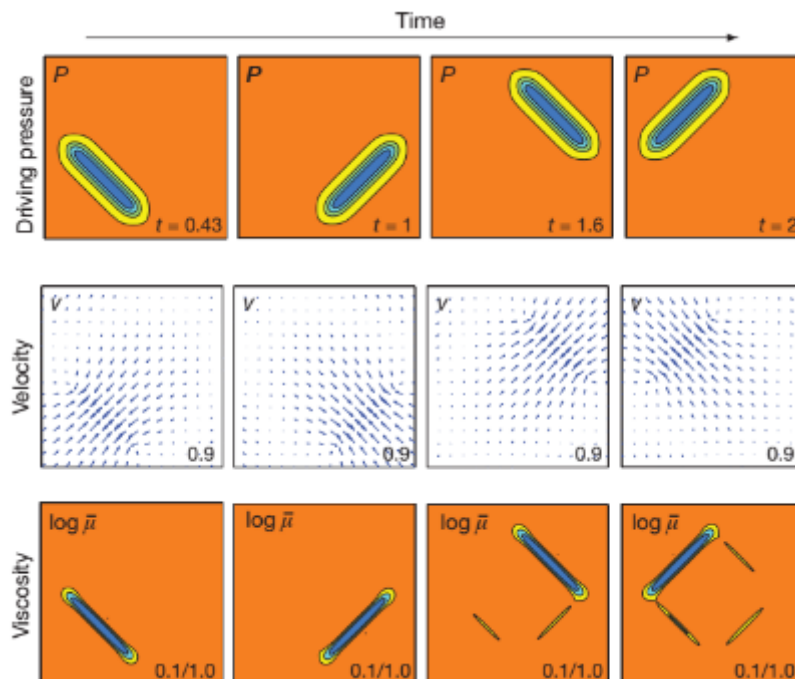


Рис. 12. Изменение давления, скорости и вязкости моделируемой области на поверхности Венеры. (Bercovici, 2014)

Диана Валенсия считает, что размер астрономического объекта имеет определяющее значение: чем больше масса планеты, тем меньше поверхностная прочность. [Valencia, O'Connell, 2007]. Она считает, что на сверхземельных планетах тектоника плит неизбежна.

Во всех рассмотренных в этой работе концепциях ведущую роль играет число Рэлея. Это число определяет «конвективность» среды. Валенсия также исходит из этого параметра и составляет законы, по которым судит о возможности наличия тектонических движений на планете. Число Рэлея в ее работе представлено ниже:

$$Ra = \alpha \rho g D^4 q / k \eta \quad (1),$$

где α -коэффициент расширения, ρ -плотность, g -гравитация, D -толщина мантии, q -тепловой поток, k -температуропроводность, η -вязкость.

Параметры, входящие в (1), Валенсия рассчитывает на основе эмпирически выведенных степенных зависимостей через массы планет и параметры Земли.

$$\rho = \rho_{\oplus} (M/M_{\oplus})^{0.20} \quad (2),$$

где ρ -плотность, $\rho_{\oplus}$ -плотность Земли, M -масса планеты, $M_{\oplus}$ -масса Земли.

$$g = g_{\oplus} (M/M_{\oplus})^{1/2} \quad (3),$$

где g -гравитация, $g_{\oplus}$ -гравитация на Земле, M -масса планеты, $M_{\oplus}$ -масса Земли.

$$D = D_{\oplus} (M/M_{\oplus})^{0.28} \quad (4),$$

где D -толщина мантии, $D_{\oplus}$ -толщина земной мантии, M -масса планеты, $M_{\oplus}$ -масса Земли.

$$\delta = \delta_{\oplus} (M/M_{\oplus})^{-0.45} \quad (5),$$

где δ -толщина литосферы, $\delta_{\oplus}$ -толщина земной литосферы, M - масса планеты, $M_{\oplus}$ -масса Земли.

Отсюда можно сделать вывод о том, что скорость конвекции зависит напрямую от массы планеты. Большая скорость конвекции сопровождается большим давлением, и преодолеть прочность литосферы становится легче. По её мнению, чем массивнее планета, тем более интенсивная будет конвекция и менее мощная литосфера. В свою очередь, чем литосфера тоньше, тем меньше её прочность. Что касается субдукции, следует отметить влияние коры планеты на так называемую плавучесть литосферы. Чем толще кора, тем более плавучей будет литосфера. Соответственно, тем стабильнее она будет держаться на поверхности.

Таким образом, масса планеты может являться ведущим параметром в образовании тектоники плит. Чем планета массивнее, тем тоньше кора, что в свою

очередь делает литосферу менее плавучей, и, следовательно, более склонной к субдукции. [Valencia, O'Connell, 2007]

Концепции [Foley et al., 2012] во много схожи с рассмотренными выше гипотезами. Однако его модели отличаются тем, что в них, степень зернистости литосферы и вязкость взаимосвязаны. Также, в отличие от Валенсии, его расчёты показывают, что помимо размера планеты, определяющим параметром также является и температура на поверхности.

На (рис.13) показана упрощенная схема образования зоны пониженной прочности. Она располагается между ячейками конвекции. Литосфера с вязкостью η_l и толщиной δ лежит над конвектирующей мантией с вязкостью η_m . Конвективные движения, направленные друг к другу навстречу, заставляют постоянно находиться в напряжении область литосферы, расположенную на «стыке» этих движений, и та под их давлением начинает ослабевать вследствие уменьшения зерен породы. Помимо этого, в результате уменьшения зёрен меняется вязкость данной области литосферы. Авторы данной точки зрения считают, что тектоника плит начинается с того момента, когда эффективная вязкость этой области становится равной вязкости подлитосферной мантии η_m .

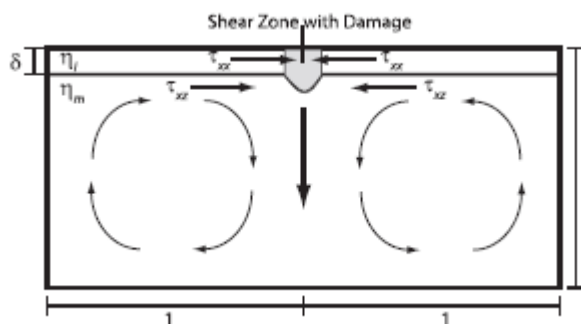


Рис. 13. Связь конвекции и областей с пониженной прочностью литосферы. (Foley et al., 2012)

Еще одним важным параметром условием образования тектоники плит является число Рэлея. Существует некоторое критическое значение отношения вязкостей, которое вводит Фолле - η_{crit} . По его мнению, значение меньше этого числа, означает, что тектоника плит образовываться не будет. По нему можно определить то, насколько вероятна тектоника плит на данной планете. Оно рассчитывается по формуле:

$$\eta_{crit} = \left(\frac{Dh_m}{Hh_l} (bRa^{3\beta})^2 \right)^{\frac{m}{p}}. \quad (6),$$

где Dh_m –число разрушения, Hh_l - число восстановления, Ra – число Рэлея, $m=2$, $p=3$, $\beta=1/3$, $b=0.05$.

Как можно увидеть из (6), критическое значение определяется восстановлением, разрушением литосферы и числом Рэлея. Именно поэтому этот параметр здесь важен.

Для каждой планеты отношение вязкостей разное, и число Рэлея для каждой планеты рассчитывается по формуле, в которой используются параметры рассматриваемого объекта:

$$Ra = \frac{\rho(R_p)g(R_p)\alpha(T_m(R_p) - T_s)d(R_p)^3}{\kappa\mu_m(R_p)} \quad (7),$$

где ρ -плотность, g -ускорение свободного падения, α -коэффициент теплового расширения, d -глубина мантии, κ - температуропроводность, μ -вязкость мантии, T_m - температура мантии, R_p - радиуса планеты, T_s - температуры на поверхности.

Из (7) видно, что число Рэлея зависит от таких параметров как плотность, разность температур в мантии и на поверхности, гравитация планеты и ее радиус. Ведущими параметрами среди них являются температура поверхности и размер планеты, то есть ее радиус, поскольку большинство параметров являются функциями от него. Таким образом, наличие тектоники плит по [Foley et al, 2012] главным образом зависит от этих параметров.

На графиках ниже (рис. 14) мы можем наблюдать зависимости температуры на поверхности от критического значения отношений вязкостей и вязкости от размера планеты. Из них видно, что Земля находится почти в крайних положениях обоих параметров, при которых возможны тектонические движения. Отсюда можно сделать вывод о том, что у Марса на сегодняшний день не может быть тектоники плит, так как он значительно отличается размерами от Земли.

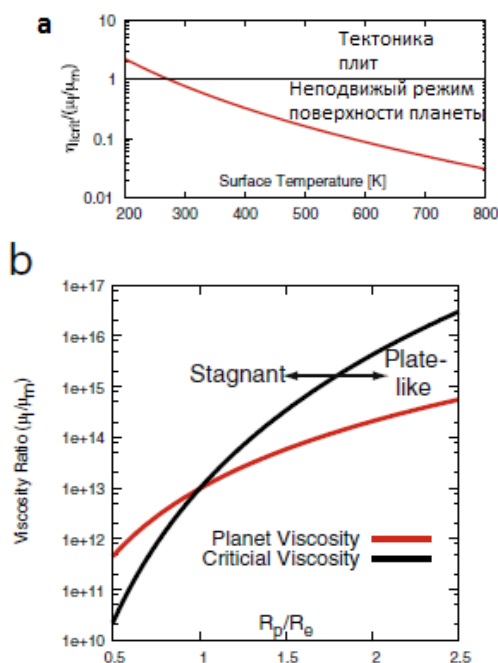


Рис. 14. Зависимости температуры на поверхности от критического значения отношений вязкостей и вязкости от размера планеты. (Foley et al, 2012)

График (рис. 14, а) показывает зависимость критического значения отношения вязкостей от температуры на поверхности. Отсюда мы можем судить о наличии тектоники плит, к примеру, на Венере. Из графика можно сделать вывод о том, что Венера слишком горяча для плитной тектоники.

Таким образом, по мнению Фолле возможность тектоники плит зависит от вязкости литосферы и астеносферы, а точнее их контраста. Также, одной из основных идей его теории является тот факт, что планета должна быть по размеру не меньше Земли (рис. 14, b). И температура при этом на астрономическом объекте должна быть относительно низкой (рис.14, а). С точки зрения Фолле, при этих условиях тектоника плит может образоваться и существовать.

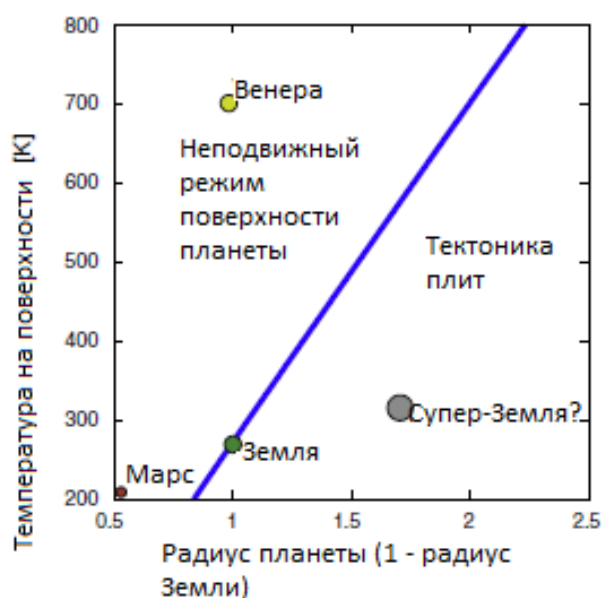


Рис. 15. Зависимость температуры от радиуса планеты. (Foley et al, 2012)

Коренага, в свою очередь полагает, что размеры планеты второстепенны [Korenaga, 2010]. Основную роль в его концепции играет наличие воды в жидком виде. Он делает вывод, что температуры и большого числа Рэлея, а то есть активности конвекции, недостаточно для того, чтобы тектоника могла зародиться. По его мнению, эти критерии способствуют только первому критерию – раздроблению литосферы, но не могут способствовать возникновению субдукции - второму критерию возникновения тектоники плит. Породы имеют слишком большой коэффициент трения, который мешает литосфере, состоящей из этих пород, субдуцировать. Коренага считает, что размер играет второстепенную роль и лишь один фактор способен снизить коэффициент трения в породах и сделать его достаточным для того, чтобы блоки могли погружаться. И этим фактором является наличие воды. Она будет приводить к гидратации горных пород, которая в свою очередь будет способствовать снижению коэффициента трения.

В целом все рассмотренные точки зрения соответствуют известным нам планетам Солнечной системы, и, несмотря на то, что они разные, они не противоречат друг другу, а скорее дополняют.

На основе изученной литературы мы делаем вывод, что существует всего 3 критерия для того, чтобы тектоника на планете имела место: размер астрономического объекта, температура на поверхности и наличие воды в жидком виде.

3.2. Обзор астрономических объектов Солнечной системы с позиции тектоники плит

3.2.1. Меркурий

Меркурий является слишком горячей планетой для того, чтобы там смогла образоваться и существовать тектоника плит. А также, размер Меркурия много меньше размеров Земли, что является еще одним доказательством в пользу отсутствия тектонической активности планеты. На планете отсутствует вода, а как мы видим, вода очень важный фактор для тектоники, не менее важный, чем температура и размеры астрономического объекта.

3.2.2 Венера

Венера очень похожа на Землю по массе и плотности. Однако на этом сходство между ними кончается, и практически во всем остальном эти планеты отличаются друг от друга. Тектоника плит на Венере отсутствует из-за высокой температуре на поверхности, как уже говорилось выше, регенерация литосферы происходит быстрее, чем ее разрушение (рис. 12). Несмотря на это, некоторые допускают, что раньше на планете могли быть подвижки. Венера имеет рельеф, которой очень напоминает рельеф, образованный в результате тектонической активности. Возможно, ранее на Венере была вода, однако в результате парникового эффекта она исчезла. [Bercovici et al, 2015].

3.2.3 Марс

Марс имеет сильно кратерированную поверхность и крупнейшие вулканические образования, каньонные комплексы, извилистые каналы с многочисленными переплетающимися руслами и вытянутыми вдоль потока островами, песчаные дюны и полярные шапки. Для Марса характерны ярко выраженные элементы ударной тектоники, сохранившиеся от периода интенсивной бомбардировки поверхности где-то в интервале древнее 4,0 млрд. лет. Верхняя часть коры Марса «насыщена» системой трещин, которая проявляется на поверхности в виде контуров валов вокруг большинства кратеров с $d > 20$ км. Размер Марса слишком мал, и если исходить из моделей [Foley et al, 2012; Valencia, O'Connel, 2007] (рис.15), тектоника плит на нем не может иметь место. Несмотря на это существуют представления о том, что Марс является или являлась тектонически активной планетой. На основе структурного анализа были обнаружены следы в рельефе, которые показывают, что на планете существуют трансформные разломы, хотя субдукции и коллизии там не наблюдается. Эти выражения в рельефе объясняются ничем иным, как результатом тектоники плит

[Yin, 2012]. Наиболее вероятно, Марс мог быть тектонически активным в первые 100 млн. лет своего существования, когда там, возможно, существовала в жидком виде вода, что укладывается в концепцию Коренаги [Korenaga, 2010].

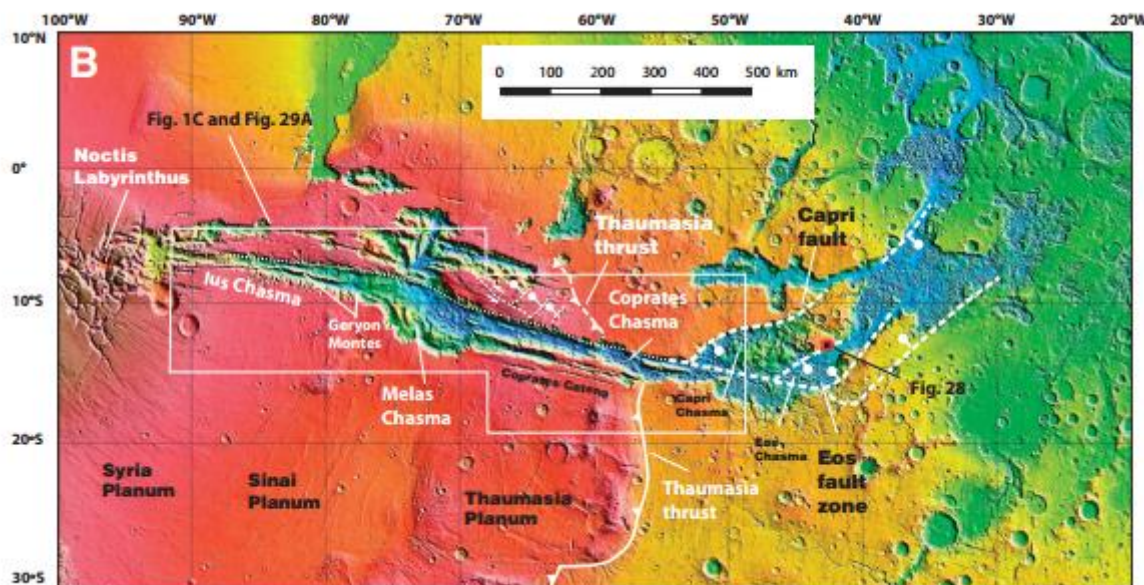


Рисунок 16. Топографическая карта долины Маринер. [Yin, 2012]

3.2.4 Европа

Европа является самым маленьким из четырех галилеевых спутников Юпитера. Ее радиус на 200 километров меньше радиуса Луны. Если исходить из моделей, где тектоника плит возможна только на сверхземельных планетах, на Европе она не должна иметь место. Поверхность Европы покрыта толстым слоем льда (по разным оценкам от нескольких километров до десятков километров), а под ним предположительно располагается приповерхностный океан из жидкой воды. Таким образом, один из трех отмеченных нами критериев тектоники плит соблюдается. Тем не менее, на сегодняшний день не представляется возможным исследовать поверхность Европы под океаном. Однако, на Европе возможен весьма специфичный вид тектоники плит на ледяной поверхности. Были обнаружены признаки движения ее ледяной коры по поверхности, которое сопровождается активной деятельностью гейзеров и ледяных вулканов [Kattenhorn, 2014]. В 2012 году наблюдения с помощью «Хаббла» показали, что на Европе действительно существуют активные гейзеры. Они выбрасывают водный пар над южным полюсом спутника на высоту до 200 километров.

Проанализировав снимки Европы, ученые университетов Айдахо и Джона Хопкинса обнаружили на ее обширной поверхности необычные геологические границы из хребтов и трещин. Исследователи определили первоначальное расположение ледяных плит, чтобы понять, как выглядела планета до нарушения в коре. (Рис. 17)

На ледяном спутнике Юпитера одна из самых молодых поверхностей, подвергаемая быстрой переработке благодаря некоторому механизму. Более

хрупкая, мобильная ледяная кора находится над пластичным, более теплым льдом. Отсюда следует, что Европа может быть одним из тех редких астрономических объектов, у которых присутствует тектоника плит в другом виде, не привычном для нас.[Kattenhorn, 2014]

Основным вопросом является суть происходящего на планете процесса. Неизвестным до последнего времени оставался тот факт, куда исчезла значительная часть поверхности. Наблюдения показывают, что исчезновение ледяной коры площадью в 22 тыс. км² является следствием глобального процесса – субдукции.

Доказательством к этому может служить псевдо-цветное изображение, розовым цветом на котором представлены области существенного сокращения поверхности. Эти зоны, шириной 30 км, могут протягиваться на расстояния больше, чем 1700 км вдоль поверхности. (Рис. 17)

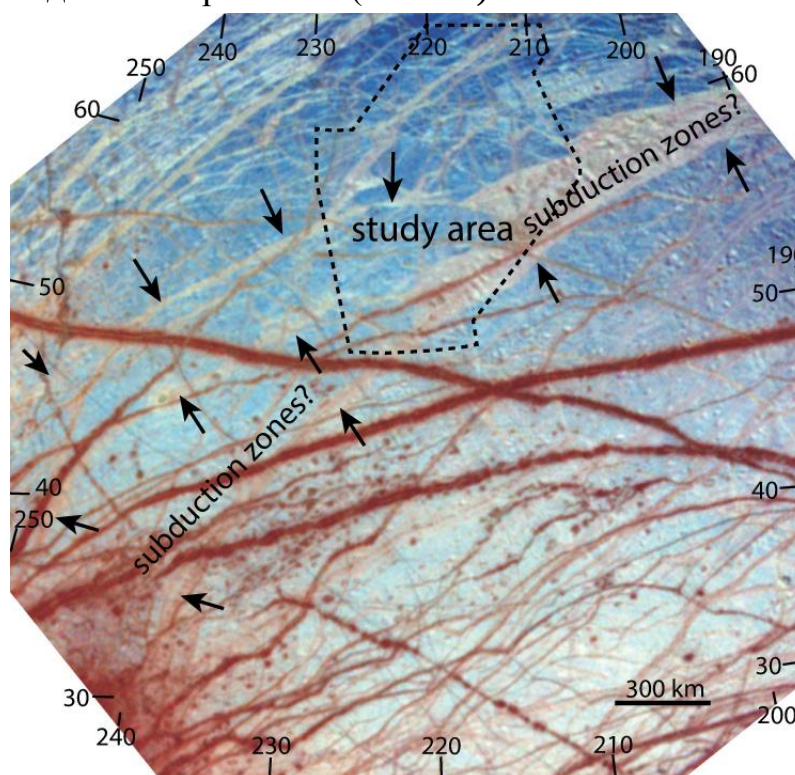


Рис. 17. Области существенного сокращения поверхности. (Kattenhorn, 2014)

Авторами определено восемь линий в доказательство к теории о том, что значительное поглощение поверхности все же существует. Посредством этого, наиболее массивная часть ледяной коры оказывается переработанной во внутренних районах планеты подобно субдукционным зонам на Земле.

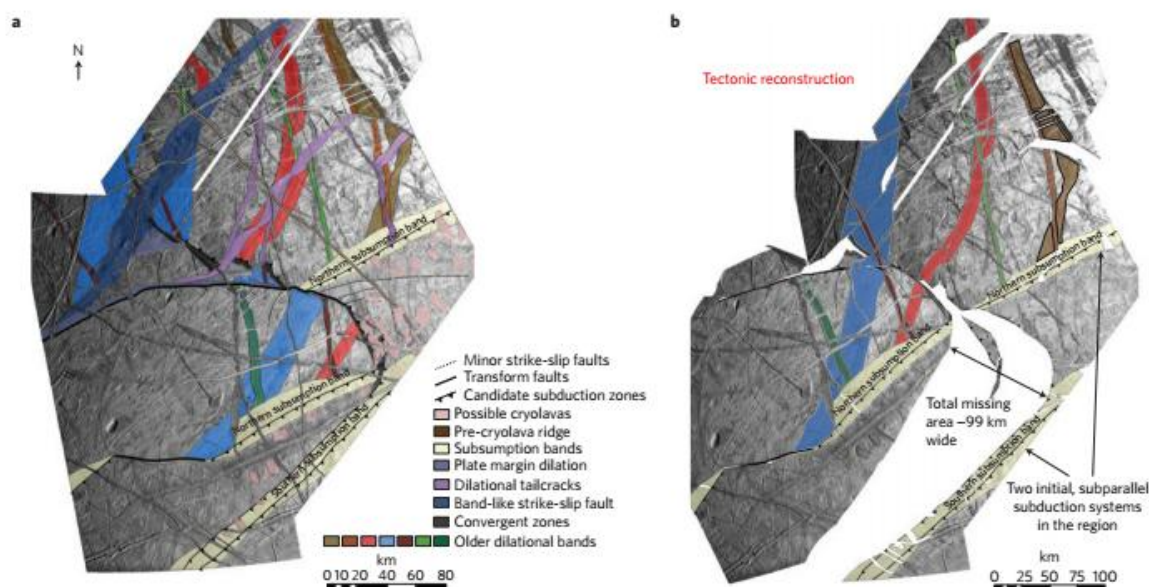


Рис. 18. Область значительного сокращения поверхности планеты. (Kattenhorn, 2014)

Из (рис. 18) мы можем увидеть интерпретацию видимых геологических единиц и тектонических реконструкций. а) зоны, выделенные светло-желтым цветом, представляют собой деформированные, вдоль которых, возможно, происходила субдукция. Все остальные структуры старше этих зон. б) тектоническая реконструкция исходного строения данного участка. Зона недостающей площади поверхности (белое пространство) 99 км шириной происходит на СЗ стороне южной части и интерпретируется, как субдуцированная (поглощенная) часть.

На (рис. 19) изображена концептуальная модель субдукции одного ледяного блока под другой. Холодная и хрупкая часть ледового покрова (приблизительно 20-30 километров) погружается в более теплую часть под поверхность планеты и, в конечном счете, поглощается. Впоследствии, возможно, происходит криоладовый выброс.

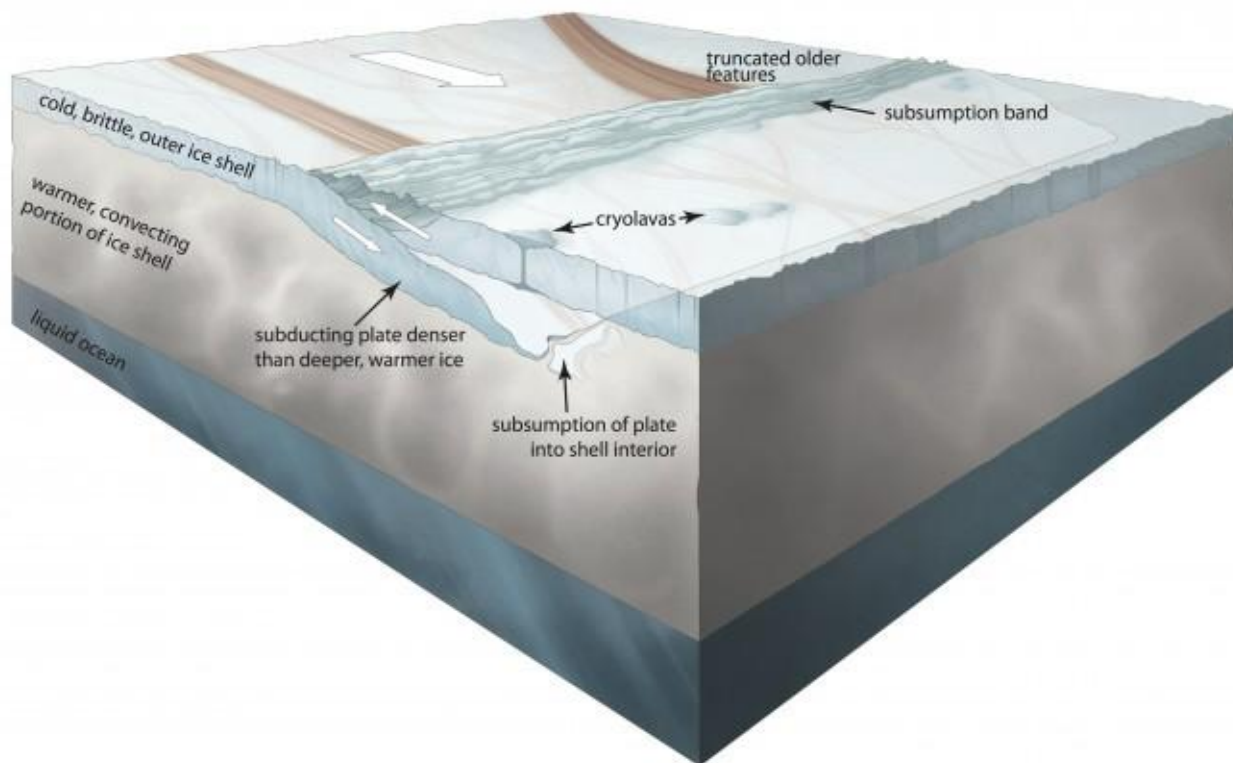


Рис. 19. Ледяная субдукция. (Kattenhorn, 2014)

Поверхностные блоки Европы, по предположениям, движутся подобно земным, расходятся и сходятся. Многие части поверхности планеты демонстрируют доказательства в виде широких пропастей в километр шириной, образованных в процессе расхождения плит.

На Земле, по мере образования новых материальных форм в срединно-океанических хребтах, старый материал поглощается в зонах субдукции, когда две тектонические плиты сходятся и напозают одна на одну.

Еще одним доказательством того, что пропавшая земля субдуцировала под другую поверхностную плиту является существование ледяных вулканов на верхней плите, которые, возможно, образовались в процессе таяния и поглощения нижней плиты. Это значит, что материал проник внутрь, а не смялся между ними.

Заключение

На сегодняшний день данная тема изучена недостаточно хорошо, и, безусловно, актуальность ее будет сохраняться длительное время. Понимание тектоники других планет поможет нам лучше понять тектонику Земли, в знании которой так же немало пробелов.

По мнению большинства учёных, температура и размер планеты являются определяющими параметрами для формирования тектонических движений. И они наиболее вероятны на супер-землях. Земля является самой большой планетой земной группы, но при этом её размеры, по мнению многих специалистов, являются минимальными или близкими к минимальным для того, чтобы тектоника плит была возможной. Это может объяснять, почему на других планетах и спутниках СС достоверно не обнаружено тектонической активности. Тем не менее, на Марсе и Венере есть довольно убедительные признаки того, что тектоника плит на этих планетах могла иметь место в прошлом. Это дает основания полагать, что размеры планеты если и являются важными критериями, то не определяющими. Так, многие склонны считать, что еще одним крайне важным условием является наличие воды на планете. Возможное наличие воды в жидком виде на Марсе и Венере в прошлом, а также вышеупомянутые следы тектонической активности хорошо согласуются с такой точкой зрения.

Кроме того, мы можем наблюдать тектонику плит в совершенно новом проявлении. И это значит, что, возможно, данный процесс является более устойчивым, менее специфичным и менее строгим, чем ранее считалось.

В процессе написания этой работы были изучены условия возникновения тектонических движений поверхности на астрономическом объекте. Также рассмотрены возможности их существования на объектах Солнечной системы. Был осуществлен поиск, анализ и обзор современной литературы, включающей исследования механизмов образования тектоники плит на объектах СС.

Список использованной литературы

1. Аллисон А., Палмер Д. Геология. Москва: Изд-во «Мир», 1984. – 568 с.
2. Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. Москва: Изд-во «Мир», 1989. – 427 с.
3. Короновский Н.В. Общая геология. Москва: Изд-во Мос. ун-та, 2002. – 448с.
4. Тёркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 1. Москва: Изд-во «Мир», 1985. - 376 с.
5. Bercovici D, Ricard Y. Plate tectonics, damage and inheritance. *Nature*. 2014. vol. 508, pp. 513–516. doi:10.1038/nature13072
6. Bercovici, D., Tackley P., Ricard Y. The Generation of Plate Tectonics from Mantle Convection. *Treatise on Geophysics*, vol. 7, Mantle Dynamics, Bercovici D. editor; Schubert G., editor in chief, Elsevier, New York. 2015. pp. 271-318.
7. Foley Bradford J., Bercovici David, Landuyt William. The conditions for plate tectonics on super-Earths: Inferences from convection models with damage. *Earth and Planetary Science Letters*. 2012. vol. 331–332, pp. 281–290.
8. Kattenhorn S. A., Prockter Louise M. Evidence for subduction in the ice shell of Europa. *Nature geosciences*. 2014. vol. 7, pp. 762-767. DOI: 10.1038/NCEO2245
9. Korenaga J. On the likelihood of plate tectonics on super-earths: does size matter. *The Astrophysical Journal Letters*. 2010. 725: L43–L46.
10. Valencia D., O’Connell R. J., Sasselov Dimitar D. Inevitability of plate tectonics on super-earths. *The Astrophysical Journal*. 2007. vol. 670: L45–L48.
11. Valencia D., O'Connell R. J. Convection scaling and subduction on Earth and super-Earths. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009. vol. 286, pp. 492–502.
12. Yin An. Structural analysis of the Valles Marineris fault zone: Possible evidence for large-scale strike-slip faulting on Mars. *Lithosphere*. 2012. vol. 4, pp. 286-330.