МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

Заочная школа
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Задание №1
Общая геология

г. Новосибирск,
2017

Авторы:
Котов А.А. (ИГМ СО РАН, НГУ), Вишневский А.В. (ИГМ СО РАН, НГУ),
Гурьев В.А. (НГУ), Баранов Л.Н. (ИГМ СО РАН, НГУ)

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Приступая к выполнению задания, внимательно прочтите методические указания. Задание состоит из теоретической части и задач для самостоятельного решения, которые поделены на части. Часть 1 – это самые простые задания, ответы на которые можно дать лишь прочитав теоретический материал. Часть 2 – задачи среднего уровня сложности, решить их может каждый, но ученик должен привлечь к решению не только знания полученные в теоретической части, но и свои размышления и логику. Часть 3 – аналогично части «С» в ЕГЭ, для решения этих задач нужно ознакомиться с дополнительной литературой и применить логические и творческие способности. Для более глубокого знакомства с материалом мы рекомендуем Вам воспользоваться списком литературы, приведенным в конце задания.

Работа может быть выполнена в ученической тетради в клетку. Если Вы собираетесь сканировать работу, то оформляйте **не в тетради, а на белых листах формата А4**. Старайтесь, чтобы количество листов было минимальным. Пишите разборчиво, так как после сканирования бывает очень сложно разобрать текст, а более высокое разрешение даёт большой размер файла. **Не нужно** присылать отдельным файлом каждую страницу Вашей работы. Сканируйте все страницы подряд – в один файл! Лучше сохранять в PDF формате.

Указывайте номера задач – они должны совпадать с теми, которые указаны в задании. Обязательно оставляйте поля для замечаний преподавателя.

На обложке тетради нужно указать:

1. Отделение (геологическое);
2. Номер задания, тема;
3. Класс, в котором Вы учитесь в школе;
4. Индекс почтового отделения по месту жительства;
5. Ваш подробный домашний адрес, контактный телефон, e-mail;
6. Фамилию, имя, отчество.

Убедительно просим оформлять обложку по указанному образцу!

Работу отправлять любым удобным для Вас способом:

- На бумажном носителе: простой или заказной бандеролью. В тетрадь вложите листок бумаги размером 6*10 см с написанным на нём Вашим почтовым адресом;
- В электронном виде:
  - По e-mail (zfmsh@yandex.ru). Обязательно просите подтвердить получение Вашей работы;
  - Через личный кабинет сайта ЗШ СУНЦ НГУ: http://zfmsh.nsu.ru.

Подробная информация (в т.ч. требования к оформлению работ в электронном виде) – на сайте ЗШ СУНЦ НГУ: http://zfmsh.nsu.ru.

Телефон/факс: (383) 363-40-66; e-mail: zfmsh@yandex.ru.
Наш адрес: Заочная школа СУНЦ НГУ, ул. Пирогова, 11/1 (Ляпунова, 3), Новосибирск-90, 630090.

(с) Специализированный учебно-научный центр НГУ, 2017 г.

Оглавление

Глава 1. Введение.....2
1.1. Понятие географии и геологии. Разнообразие геологических дисциплин.....2
1.2. Земля в космическом пространстве.....4

Глава 2. Строение Земли.....7

Глава 3. Тектонические процессы.....13
3.1. Введение в тектонику и магматизм.....13
3.2. Внутриплитный магматизм.....17
3.3. Образование континентальной коры.....19
3.4. Цикл Уилсона.....20

Список литературы.....22

Задачи для самостоятельного решения.....23

Глава 1. Введение

1.1. Понятие географии и геологии. Разнообразие геологических дисциплин

Начиная наш курс, обратимся к простому наблюдению: каждый из нас, не зная, что именно представляет из себя геология, понимает, что поверхность нашей планеты очень неоднородна и это прекрасно видно на обычной физической карте, космическом снимке или глобусе. В одной части Земли находятся бескрайние поля и степи, другая её часть занята большими горными цепями, ледниками, где-то извергаются вулканы и происходят сильные землетрясения, а где-то простираются огромные океаны и моря. Очевидно, что такая неоднородность поверхности Земли появилась неспроста и обусловлена сложными процессами, происходящими вокруг, внутри и на поверхности Земли с момента её возникновения и по сей день.

"*География – наука о земной поверхности*" – казалось бы, короткое определение, но, на самом деле, география – очень обширная наука. Её раздел, который занимается изучением географической оболочки Земли, её состава, строения, структуры, особенностей формирования и развития, а также пространственных неоднородностей называется *физической географией*. *Географическая оболочка* – материальная система, образованная при взаимопроникновении и взаимодействии атмосферы, гидросферы, литосферы, биосферы, а на современном этапе – и человеческого общества. Основу физической географии составляют такие разделы, как картография, топография, геодезия и географические информационные системы (ГИС). Эти дисциплины являются неотъемлемой частью как географии, так и геологии. ГИС представляют из себя метод графической визуализации пространственных данных. Они, например, дают возможность строить цифровые карты местности или модели карьеров для добычи полезных ископаемых.

Процессы, обуславливающие то, что мы видим нашу планету такой, какая она есть изучает *геология* – совокупность наук о строении, происхождении и развитии Земли, основанная на изучении геологических (протекающих на Земле) процессов, вещественного состава, структуры Земли всеми доступными методами с привлечением и других наук. Коротко геологию можно определить, как науку о составе, строении и закономерностях развития Земли.

Геология прошла длительный и сложный путь развития. Круг объектов исследования расширялся, и распространился на всю Землю, в том числе и на её глубинные оболочки, и объекты Солнечной системы. В геологии шли процессы дифференциации подходов и объектов изучения, это сопровождалось специализацией научных направлений и интеграцией знаний. Совершенствовались методы и инструменты исследований.

Главное практическое значение геологии – это, конечно, разработка вопросов поиска и добычи полезных ископаемых (нефть, рудные полезные ископаемые, вода и др.). Но, так или иначе, невозможно успешно развивать практические направления в геологии, не имея представления о процессах, в результате которых образуются скопления полезных компонентов. В любой науке фундаментальное знание, подразумевающее теоретические и экспериментальные исследования, яв-

ляется необходимым требованием для прогресса. Ведь любые открытия и технологии непременно опираются на положения фундаментальной науки.

Обращаясь к вопросу о разнообразии геологических направлений, давайте познакомимся с таблицей, в которой приведены некоторые геологические дисциплины и соответствующие предметы изучения. И еще раз отметим многостороннюю связь геологии с географией (ландшафтоведением, климатологией, гидрологией, гляциологией, океанографией) в познании различных геологических процессов, совершающихся на поверхности Земли. Взаимосвязь этих двух наук особо проявляется, когда речь заходит о рельефе и закономерностях его развитиях. Геология при изучении рельефа опирается на данные географии, так же, как и география опирается на историю геологического развития региона и взаимодействия различных геологических процессов. Вследствие этого появилась такая наука, как геоморфология, которая фактически является также пограничной наукой. Из Таблицы 1 становится понятно, что объектом изучения в геологии являются не только породы и слагающие их минералы. Здесь задействовано и поведение химических элементов (геохимия), и глобальные глубинные процессы (геодинамика), и многое другое.

Геология – очень развитая и обширная дисциплина, ведь она охватывает все природные аспекты Земли и космоса, которые так или иначе повлияли на историю нашей планеты. Прошли те времена, когда один ученый занимался многими фундаментальными направлениями. В условиях очень быстрого развития человечества, в каждой узкой области науки есть свои специалисты, которые шаг за шагом вместе узнают все больше о нашей и других планетах, их недрах и колоссальных процессах, происходящих на больших глубинах.

Таблица 1. Объекты изучения основных геологических дисциплин

Дисциплина	***Объект изучения***
Геохимия	Химические элементы и их поведение в природе
Кристаллография, кристаллохимия, кристаллофизика	Кристаллы природных и синтетических веществ
Минералогия	Минералы и их ассоциации
Петрография, петрология, минераграфия, рудная геологиям	Горные породы, руды и их образование
Структурная геология, тектоника, геофизика	Геологические тела и формации
Геоморфология	Рельеф
Структурная геология, тектоника	Складки, разломы
Планетология	Планеты
Геодинамика	Астеносфера, мантия, поведение вещества в Земле

1.2. Земля в космическом пространстве

Основной причиной образования космических тел, включая Солнечную систему, считается Большой Взрыв. В результате него крохотные частицы материи, обладая огромной энергией разлетелись на большие расстояния. Образование небесных тел, в том числе Земли, обусловлено процессом *аккреции* – приращением массы небесного тела путём гравитационного притяжения материи из окружающего пространства. Закон всемирного тяготения, известный Вам из школьного курса физики, описывает этот процесс. Земля образовалась около 4,54 млрд лет назад путём аккреции из протопланетного диска – дискообразной массы газа, пыли, оставшихся от образования Солнца, которая и дала начало Солнечной системе.

Солнечная система – комплекс космических тел, включающая, помимо центральной звезды – Солнца, восемь планет, их спутники, малые (карликовые) планеты, кометы, мелкие метеорные тела и космическую пыль, движущиеся в области преобладающего гравитационного действия Солнца.

В Солнце сосредоточено 99,866% массы всей Солнечной системы. Планеты, вращающиеся вокруг Солнца, делятся на две группы, которые заметно отличаются по свойствам. В первую группу (земную) входят Меркурий, Венера, Земля и Марс. Вторая группа – газовых и ледяных гигантов, представлена Юпитером, Сатурном, Ураном и Нептуном. Плутон, долгое время рассматривавшийся как девятая планета, всилу многих причин (в том числе из-за открытия многочисленных объектов пояса Койпера), был переведен в статус карликовых планет.

У планет земной группы схожи строение и химический состав. В основном, они все состоят из соединений кремния и железа. Остальные элементы также присутствуют, но их гораздо меньше. Во всех четырёх планетах выделяются железные ядра. Считается, что только Венера не имеет расплавленного ядра, а у остальных планет земной группы часть ядра представлена расплавленным веществом. Также в них всех выделяется силикатная мантия. Изучение строения планет земной группы дает геологам возможность судить об эволюции Земли на ранних этапах. Согласно всемирному закону тяготения, вблизи Солнца сила притяжения гораздо больше, нежели на удалении от него. Это определяет образование планет земной группы из плотного, богатого железом вещества внутренней части протопланетного диска. В свою очередь, планеты внешней группы сформировались из преимущественно газовой и менее плотной части протопланетного диска.

В составах планет земной и внешней групп также есть существенные различия, которые приведены на Рисунке 1. Атмосферы внешних планет преимущественно состоят из водорода, гелия и метана – более легких газов, нежели те, что представляют атмосферы планет земной группы (азот, кислород, углекислый газ).

Предполагается, что вулканическая дегазация создала первичную атмосферу, но в ней почти не было кислорода и она была бы токсичной для людей и современной жизни в целом. Земля еще не успела остыть и была подвержена постоянным столкновениям с другими космическими телами, поэтому считается, что большая её часть была расплавленной. В процессе своей эволюции Земля дифференцировалась, поделилась на слои, сильно различающиеся по составу и свойствам. Предполагается, что одно из крупных столкновений привело к имеющему-

Рисунок 1. Сравнение состава атмосфер планет Солнечной системы

ся наклону земной оси и формированию Луны. Предполагается, что как минимум 15% массы Луны состоит из вещества земной мантии, что указывает на то, что её образование напрямую связано с Землей. Оставшаяся доля, очевидно, принадлежит телу, которое столкнулось с Землей – *импактору* (от англ. impact – взаимодействие, удар).

Со временем такие космические бомбардировки прекратились, что позволило планете остыть и образовать твердую кору. По большому счету, земная кора – это тонкий остывший верхний слой Земли, поделенный на части – плиты. Наиболее подвижные и летучие компоненты Земли при её остывании улетучились от центра к периферии и образовали атмосферу и гидросферу. Этот процесс называется *дегазацией* мантии. По одной из теорий, именно дегазация является причиной появления воды на поверхности Земли. Другая теория предполагает, что вода на Землю была принесена космическими телами, которые активно бомбардировали нашу планету на этапе её формирования. Так или иначе, Земля стала, наконец, гостеприимной для жизни, а самые ранние её формы обогатили атмосферу кислородом.

Глава 2. Строение Земли

Говоря о строении Земли, отметим, что есть три подхода к решению этого вопроса: геофизический, экспериментальный и вещественный. В первом случае учёные определяют состав Земли по скорости прохождения и характеру отражения продольных и поперечных сейсмических волн, о которых вам известно из курса физики. Во втором случае специалисты моделируют глубинные процессы, стараясь создать в специальных устройствах те же параметры температуры и давления, что и на глубине. В третьем случае геологи судят о недрах Земли по реальным вещественным образцам, породам и минералам, вынесенным из земных глубин, например, вулканами или добытым с помощью скважин.

В случае с непосредственным изучением вещественного состава Земли учёные не могут похвастаться большим количеством полученных данных, ведь человек ограничен в глубинах изучения недр. Наиболее глубокая скважина, пробуренная на сегодняшний день, составляет 12262 м, при радиусе Земли 6371 км. То есть своими силами человек не смог создать условия для извлечения материала с глубины более, чем 0,2 % от радиуса планеты. Создание сверхглубоких скважин является сложной технологической задачей, которая требует больших затрат и времени. На той же Кольской сверхглубокой из-за множества аварий максимальная глубина была достигнута только за 20 лет работы (1970-1990 гг.).

Но более глубокие горизонты Земли все же доступны для непосредственного изучения. Этому способствуют извержения вулканов, выносящие на поверхность обломки пород мантии, заключенные в излившейся магме. Такие же возможности дают алмазоносные трубки взрыва, глубина возникновения которых соответствует 150-200 км.

Там, где пропадает возможность изучать недра непосредственно по образцам, в дело вступает экспериментальная геология и моделирование. Данный подход основан на изучении поведения различных веществ при высоких температурах и давлениях, подобно тем, что имеются в глубинах Земли. Методы математического моделирования гармонично дополняет изучение вещества недр и поведение земных толщ на разных глубинах.

И все же основным подходом к изучению глубинного строения Земли на сегодняшний день является использование геофизических методов. Два основных направления геофизических исследований, дающих нам представление о строении нашей планеты – это сейсмическое и магнитное зондирование. Первый метод основан на изучении характера отражения продольных и поперечных волн в различных слоях Земли. Благодаря этому методу мы имеем полноценное представление о строении Земли (включая ядро) и динамических процессах внутри неё. Второй метод основан на изучении естественного электромагнитного поля Земли на глубинах не более первых сотен километров, что дает нам качественное представление о строении земной коры и верхней мантии.

Давайте разберёмся, как выглядит Земля в разрезе с точки зрения геофизики. Изучение путей и скоростей распространения сейсмических волн позволили разработать сейсмическую модель внутреннего строения недр Земли.

Сейсмические волны, распространяясь от очага землетрясения вглубь Земли, испытывают наиболее значительные скачкообразные изменения скорости, преломляются и отражаются на сейсмических разделах, расположенных на глубинах 5-80 км и 2900 км от поверхности. Эти резкие сейсмические границы позволяют разделить недра планеты на 3 главные внутренние геосферы – земную кору, мантию и ядро (Рис. 2). Важно отметить, что волны, используемые в исследованиях, делятся на два типа: P-волны – продольные, распространяющиеся в любой среде, и S-волны – поперечные, которые не распространяются в жидкой и газообразной средах.

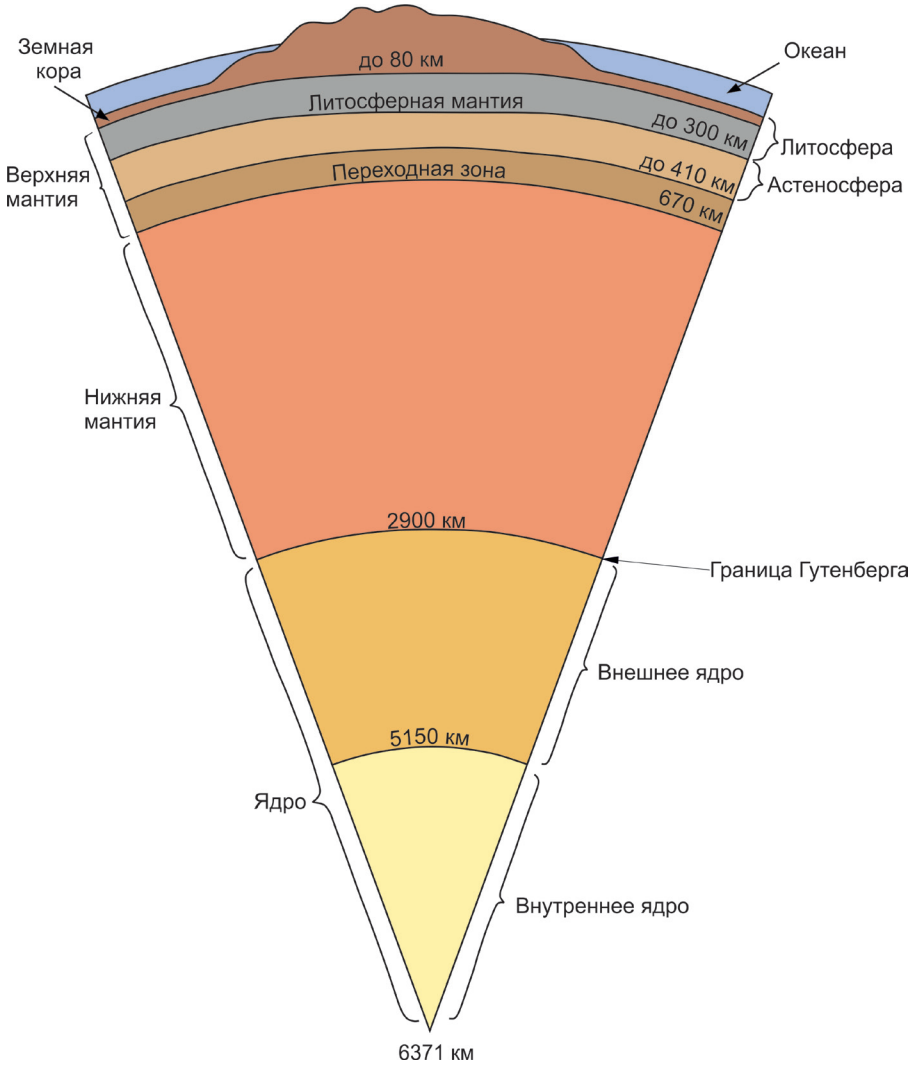

Рисунок 2. Строение Земли

Земная кора от мантии отделяется резкой сейсмической границей, на которой скачкообразно возрастает скорость и продольных, и поперечных волн. Так, скорость поперечных волн резко возрастает с 6,7-7,6 км/с в нижней части коры до 7,9-8,2 км/с в мантии. Эта граница была открыта в 1909 г. югославским сейсмологом Мохоровичичем и впоследствии была названа его именем (часто кратко называемой границей Мохо, или границей М). Средняя глубина границы составляет 35 км (нужно заметить, что это весьма приблизительное значение в силу разной мощности в разных геологических структурах); при этом под континентами глубина раздела Мохоровичича может достигать 75-80 км (что фиксируется под молодыми горными сооружениями – Андами, Памиром), под океанами она находится на минимальной глубине – 3-4 км.

Ещё более резкая сейсмическая граница, разделяющая мантию и ядро, фиксируется на глубине 2900 км. На этом сейсмическом разделе скорость P-волн скачкообразно падает с 13,6 км/с в основании мантии до 8,1 км/с в ядре; S-волны – с 7,3 до 0 км/с. Исчезновение поперечных волн указывает на то, что внешняя часть ядра обладает свойствами жидкости. Сейсмическая граница, разделяющая ядро и мантию, была открыта в 1914 г. немецким сейсмологом Гутенбергом, и её часто называют границей Гутенберга, хотя это название и не является официальным.

Резкие изменения скорости и характера прохождения волн фиксируются на глубинах 670 км и 5150 км. Граница 670 км разделяет мантию на верхнюю мантию (33-670 км) и нижнюю мантию (670-2900 км). Граница 5150 км разделяет ядро на внешнее жидкое (2900-5150 км) и внутреннее твёрдое (5150-6371 км). Существенные изменения отмечаются и на сейсмическом разделе 410 км, делящим верхнюю мантию на два слоя (Рис. 2).

Полученные данные о глобальных сейсмических границах дают основание для рассмотрения современной сейсмической модели глубинного строения Земли.

Внешней оболочкой твёрдой Земли является земная кора, ограниченная границей Мохоровичича. Эта относительно маломощная оболочка, толщина которой составляет от 4-5 км под океанами до 75-80 км под континентальными горными сооружениями. В составе земной коры отчетливо выделяется верхний осадочный слой, состоящий из неметаморфизованных (не подверженных сильным изменениям) осадочных пород, среди которых могут присутствовать вулканические породы, и подстилающая их кристаллическая кора, образованная метаморфизованными и магматическими породами. Любая горная порода представляет собой определенное сочетание минералов, являющихся, в свою очередь, химическими элементами или их природными соединениями. В геологии принято классифицировать горные породы по содержанию нескольких основных компонентов, основным из которых является SiO_2 (кремнезём). Так, например, породы, содержащие много кремнезёма (> 63 мас. %), принято называть «кислыми», а породы, содержащие меньше кремнезёма – более «основными». Более подробно с классификацией горных пород мы познакомимся чуть позже. Существуют два главных типа

земной коры – континентальная и океаническая, принципиально различающиеся по строению, составу, происхождению и возрасту.

Распространённость химических элементов связана с их положением в периодической системе. Как отмечал ещё Дмитрий Иванович Менделеев, наиболее распространённые элементы земной коры располагаются в начале периодической системы. Главными элементами-строителями земной коры являются O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, составляющие более 98 % её массы. Ведущее место среди них принадлежит кислороду, на долю которого приходится почти 50 % массы земной коры и около 92 % объёма. Это вовсе не означает, что земная кора такая «воздушная». Кислород является наиболее распространённым элементом, большинство остальных элементов образуют с ним более сложные соединения – оксиды, гидроксиды, силикаты и др. Также по преобладающим химическим элементам земную кору иногда называют оксисферой или сиалической оболочкой. Это название появилось от принятых обозначений кремния (Si) и алюминия (Al), соединения которых наиболее широко представлены в земной коре. Вещество земной коры в порядке усложнения его организации образует иерархический ряд: химический элемент – минерал – горная порода. Именно в такой последовательности рассматривается ниже вещественный состав коры. Наиболее достоверные сведения о химическом составе земной коры относятся к её верхней части (до глубины 16-20 км), доступной для непосредственного изучения. Проблемами химического состава, закономерностями его изменения в пространстве и времени занимается наука *геохимия*. По данным современной геохимии, в земной коре установлено 93 химических элемента. Большинство из них являются сложными, то есть представлены смесью различных изотопов. Лишь 22 химических элемента (например, Na, Mn, Au и др.) не имеют изотопов и поэтому называются простыми. Распределены химические элементы в земной коре крайне неравномерно.

Континентальная кора залегает под континентами и их подводными окраинами, имеет мощность от 35-45 км до 55-80 км, в её разрезе условно выделяются 3 слоя. Верхний слой, как правило, сложен осадочными породами, включающими небольшое количество слабометаморфизованных и магматических пород. Этот слой называется осадочным. Геофизически он характеризуются низкой скоростью P-волн, в диапазоне 2-5 км/с. Средняя мощность осадочного слоя около 2,5 км (в горных областях он может отсутствовать вовсе, а на платформах достигать 10 и более км). Ниже располагается слой, сложенный магматическими и метаморфическими породами богатыми кремнезёмом (SiO_2). Нижняя часть коры (гранулито-базитовый слой) также представлен магматическими и метаморфическими породами, но уже менее богатыми кремнезёмом, то есть более основными, и имеющими свои особенности химического состава и структуры. Стоит отметить, что скорости прохождения продольных волн в коре увеличиваются с глубиной. Это напрямую связано с увеличением плотности пород, слагающих кору.

В формировании континентальной коры принимают участие породы различного геологического возраста, вплоть до самых древних – возрастом около 4 млрд лет. Для того чтобы представить себе состав и строение земной коры – важ-

нейшей для нас геосферы Земли в целом, рассмотрим детально её вещественный состав, а также современные взгляды на её строение.

Океаническая кора имеет относительно небольшую мощность, в среднем 6-7 км. В её разрезе в самом общем виде можно выделить 2 слоя. Верхний слой – осадочный, характеризующийся малой мощностью (в среднем около 400 м) и низкой скоростью сейсмических волн. Нижний слой сложен основными магматическими породами (вверху – базальтами, ниже – основными и ультраосновными интрузивными породами). Возраст древнейших пород современной океанической коры составляет около 160 млн лет. То есть под морской толщей нет настолько древних пород, какие могут встретиться на суше. При этом важно отметить, что на суше всё же встречаются фрагменты океанической коры с гораздо большим возрастом, называемые *офиолитами*. Своим образованием офиолиты обязаны тектоническим процессам, речь о которых пойдёт ниже.

Мантия представляет собой наибольшую по объёму и массе внутреннюю оболочку Земли, ограниченную сверху границей Мохо, снизу – границей Гутенберга. В её составе выделяется верхняя и нижняя мантии, разделённые границей ~670 км. Мантия сложена силикатными (46 мас. % SiO_2) высокомагнезиальными (37 мас. % MgO) породами.

Верхняя мантия по геофизическим особенностям разделяется на два слоя. Верхний слой – *литосферная мантия* – простирается от границы Мохо до глубин 50-80 км под океанами и 200-300 км под континентами и характеризуется плавным нарастанием скорости как продольных, так и поперечных сейсмических волн, что объясняется уплотнением пород за счёт литостатического давления вышележащих толщ. Ниже литосферной мантии до глобальной поверхности раздела 410 км расположен слой пониженных скоростей. Как следует из названия слоя, скорости сейсмических волн в нем ниже, чем в литосферной мантии. Более того, на некоторых участках выявляются линзы, вообще не пропускающие S-волны, это даёт основание предполагать, что вещество мантии на этих участках находится в частично расплавленном состоянии. Этот слой называют *астеносферой* (от греч. «asthenes» – слабый и «sphair» – сфера) (Рис. 2). Таким образом, астеносфера – это слой в верхней мантии (расположенный на глубине около 100 км под океанами и около 200 км и более под континентами), выявляемый на основании снижения скорости прохождения сейсмических волн и обладающий пониженной прочностью и вязкостью.

Наличие пластичного астеносферного слоя, отличающегося по механическим свойствам от твёрдых вышележащих слоёв, даёт основание для выделения литосферы – твёрдой оболочки Земли, включающей в себя земную кору и литосферную (подкоровую) мантию, расположенную выше астеносферы. Мощность литосферы составляет от 50 до 300 км. Нужно отметить, что литосфера не является монолитной каменной оболочкой планеты, а разделена на отдельные плиты, постоянно движущиеся по пластичной астеносфере. К границам литосферных плит приурочены очаги землетрясений и современного вулканизма.

Глубже раздела 410 км в верхней мантии повсеместно распространяются и продольные и поперечные волны, а их скорость относительно монотонно нараста-

ет с глубиной. В нижней мантии, отделённой резкой глобальной границей 670 км, скорость P- и S-волн монотонно, без скачкообразных изменений, нарастает, соответственно, до 13,6 и 7,3 км/с вплоть до раздела Гутенберга.

Во внешнем ядре скорость продольных волн резко снижается до 8 км/с, а поперечные волны полностью исчезают. Исчезновение поперечных волн даёт основание предполагать, что внешнее ядро Земли находится в жидком состоянии. Ниже раздела 5150 км находится внутреннее ядро, в котором поперечные волны вновь имеют возможность распространяться, что указывает на его твёрдое состояние.

Состав ядра непосредственно не известен, и может быть предположительно оценен из нескольких источников. Во-первых, видимо, наиболее близкими веществу ядра образцами являются железные метеориты, которые, представляют собой фрагменты ядер астероидов и протопланет. Однако железные метеориты не могут быть полностью эквивалентны веществу земного ядра, так как они образовались в гораздо меньших телах, а значит при других физико-химических параметрах. С другой стороны, из данных гравиметрии известна плотность ядра, и это накладывает на его состав дополнительные ограничения. Так как плотность ядра примерно на 10% меньше, чем плотность сплавов железо-никель, то предполагается, что ядро Земли содержит больше лёгких элементов, чем железные метеориты. Наконец, состав ядра можно оценить исходя из геохимических соображений. Если мы каким-либо рассчитаем первичный состав Земли и вычислим, какая доля элементов находится в других геосферах, то тем самым могут быть построены оценки состава ядра. Большую помощь в таких вычислениях оказывают высокотемпературные и высокобарические эксперименты по распределению элементов между расплавленным железом и силикатными фазами. По разным оценкам ядро содержит 80-85 мас. % Fe, 4,5-5,5 мас. % Ni, 6,0 - 7,5 мас. % Si. Фундаментальный вывод из описанной выше модели строения Земли состоит в том, что наша планета состоит из серии концентрических оболочек, которые сильно отличаются друг от друга по составу и агрегатному состоянию.

Глава 3. Тектонические процессы

3.1. Введение в тектонику и магматизм

Обывателю покажется, что наша планета застывшая и недвижимая, но, на самом деле, это не так – Земля очень динамична. Вещество в недрах находится в постоянном движении. В мантии существует постоянное конвективное течение: вещество, нагревается у ядра и поднимается к поверхности, а затем остывая вновь опускается в глубины. При этом литосферные плиты, на которые поделена верхняя твёрдая оболочка Земли – литосфера, движутся в горизонтальном направлении под действием этих конвективных потоков. Это движение, отражающее развитие структуры земной коры и Земли в целом, называется *тектоническим*. В вопросах тектоники долгое время не было однозначной теории, которая бы полноценно описывала процессы движения вещества внутри Земли, имела бы математическое обоснование и могла бы быть экстраполирована в геологическое прошлое и будущее нашей планеты. Лишь относительно недавно в геологии закрепилась теория под названием «тектоника литосферных плит». Она полноценно описывает законы, которым подчиняются глубинные процессы. Рассмотрим 6 основных положений тектоники литосферных плит:

1) Первым положением в тектонике литосферных плит является разделение верхней оболочки нашей планеты на две части, отличающиеся друг от друга по вязкости: литосферу (хрупкая и жёсткая) и астеносфера (пластичная).
2) Согласно второму положению литосфера делится на плиты. Всего выделяется 7 крупных, 7 средних и множество мелких плит, расположенных в виде поясов между более крупными (Рис. 3, 4). Отметим, что основанием для проведения границ между плитами послужило размещение очагов землетрясений.
3) Существует три типа взаимных перемещений и соответственно границ между литосферными плитами (Рис. 5):

   Конвергентные границы, на которых происходит сближение плит, при этом по характеру взаимодействия плит выделяются процессы: *субдукция, коллизия и обдукция*. Процесс, когда одна литосферная плита погружается под другую называется *субдукция*. В ходе этого процесса погружающаяся плита тонет в мантии. Субдукция также сопровождается возникновением зон глубокофокусных землетрясений и формированием активных вулканических дуг (например, Курильская дуга). Скорость субдукции измеряется в см/год и может достигать 10 см/год. Суммарная протяжённость зон субдукции на Земле составляет около 45000 км. Основными причинами подобного механизма являются различия в физических свойствах взаимодействующих плит и конвективные потоки в мантии: как правило, одна плита погружается под другую по причине своей избыточной массы и влияния потока вещества мантии, который, в свою очередь, поддерживается погружаемой плитой.

   В редких случаях происходит так, что океаническая кора надвигается на континентальную. Этот процесс называется *обдукция*. Комплексы пород, которые раньше слагали океаническую кору, но оказались на континен-

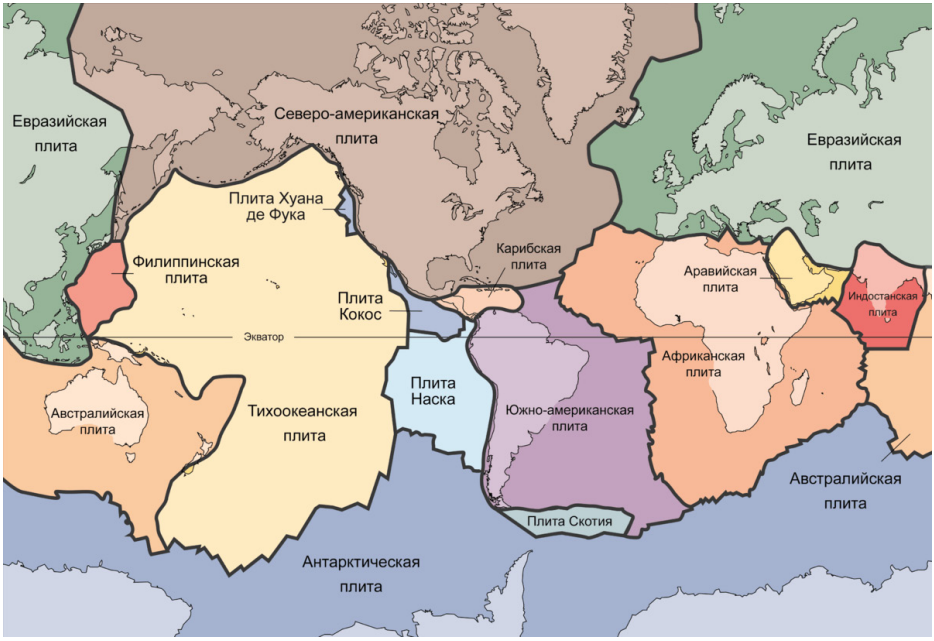

Рисунок 3. Карта тектонических плит

тальной называются *офиолитами*. Как правило, обдукция происходит, когда какие-либо факторы нарушают нормальное поглощение океаническое коры в мантию, как это должно происходить при субдукции. Считается, что на сегодняшний день единственное место, где данный процесс имеет место быть – это юго-западное побережье Южной Америки.

При столкновении и взаимодействия двух блоков, которые из-за своих свойств не могут погрузиться друг под друга происходит *коллизия*. В результате этого процесса происходит смятие взаимодействующих плит, которое ведет к образованию горных цепей (Альпийско-Гималайский горный пояс).

Дивергентные границы характеризуются тем, что вдоль них происходит раздвижение плит. Процесс раздвижения, в свою очередь, называется *спредингом*. Так как на дивергентных границах происходит раздвижение плит, то освободившееся пространство заполняется поднимающимся к поверхности мантийным веществом, образуя *рифты* - крупные линейные впадины в земной коре, сопровождающиеся излиянием магмы на поверхность. Этот процесс обусловливает образование новой океанической коры. Именно поэтому дивергентные границы еще называют конструктивными. Основной причиной спрединга является нагнетаемый снизу мантийный конвективный поток. Стоит отметить, что спрединг может происходить как на континенте, так и в океане.

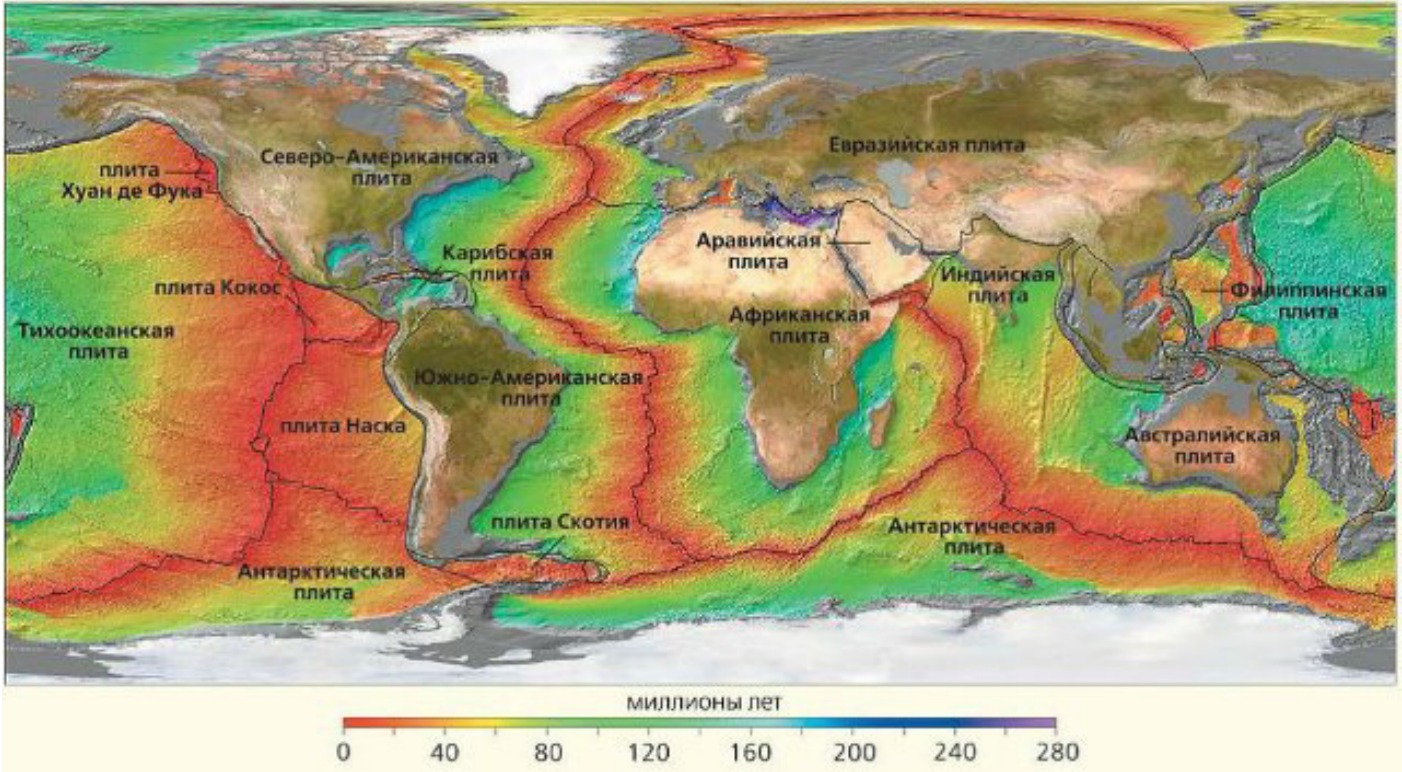

Рисунок 4. Карта тектонических плит, иллюстрирующая возраст океанической коры

Срединно-океанический хребет (СОХ) – сеть хребтов, располагающихся в центральных частях всех океанов. По большому счету, представляет собой подводные горные сооружения, образовавшиеся в результате излияния лавы. Является проявлением *океанического рифтогенеза*. В этих структурах, в процессе спрединга, происходит образование большей части новой океанической коры на Земле. В дальнейшем новообразованная кора удаляется от места своего рождения по причинам мантийной конвекции и «затягивания» океанических блоков в зонах субдукции. Таким образом процесс существования океанической коры, от образования до погружения в мантию, ограничивается тем временем, за которое только что излитая на морское дно лава успевает дойти до зоны субдукции. Если не брать в расчет офиолиты, то возраст самой древней океанической коры не превышает 180 млн лет (Рис. 4).

Континентальный рифтогенез происходит, зачастую, из-за действия плюмов (мантийных струй), о которых мы поговорим чуть позже. Самыми яркими проявлениями этого процесса являются оз. Байкал и Восточно-Африканский рифт – место на континенте, где происходит раздвижение и утонение континентальной коры, а в некоторых местах – и образование коры океанического типа (долина Афар, Эфиопия). Развитие этой зоны со временем может привести к образованию нового океана.

Трансформные границы, вдоль которых происходит горизонтальное скольжение плит относительно друг друга. Трансформные движения представлены одноимёнными разломами на океанической коре или, реже, на континентальной (разлом Сан-Андреас).

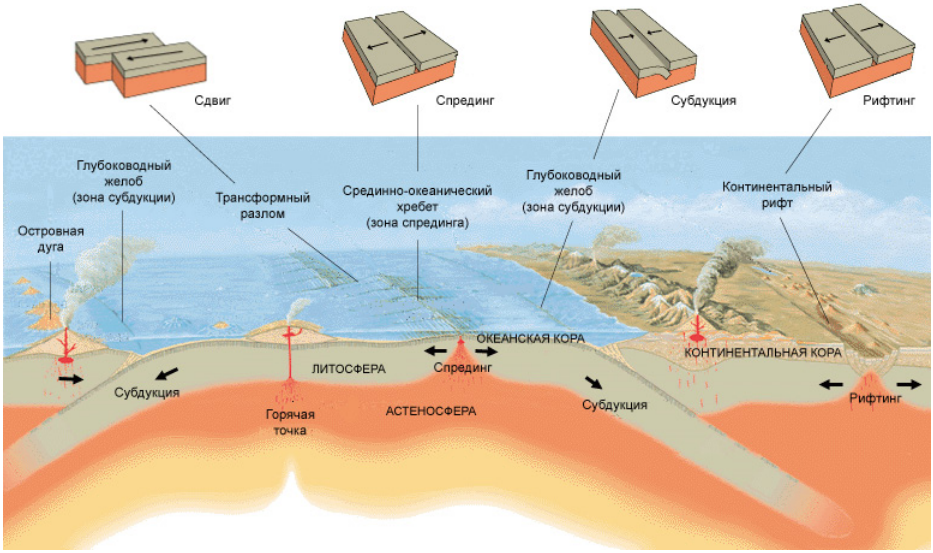

Рисунок 5

Схематичное изображение геодинамических процессов и их проявлений на поверхности Земли

На сегодняшний день тектоника плит подтверждена прямыми измерениями скорости движения блоков литосферы. Это стало возможно благодаря развитию высокоточных спутниковых систем GPS и методам интерферометрии излучения от далеких небесных тел.

4) Горизонтальные перемещения плит подчиняются законам сферической геометрии, а точнее – теореме Эйлера (XVIII в.). Говоря просто, движение литосферной плиты можно представить, ведя пальцем по глобусу, символизируя перемещение точки на плите, при этом перемещение будет идти не по прямой, а по дуге, описанной вокруг центра глобуса.
5) Объем поглощаемой в зонах субдукции океанической коры равен объему коры, нарождающейся в зонах спрединга. Таким образом, субдукция, коллизия и обдукция полностью компенсируют спрединг, а объем Земли и её радиус остаются постоянными.
6) Основная причина движения плит – мантийная конвекция. Любой конвективный поток состоит из восходящий прогретых и нисходящих остывших частей. Восходящий поток возникает из-за тепла, выделяющегося от ядра, которое заставляет разогретые части нижней мантии подниматься к поверхности. Конвективные ячейки внутри Земли обоснованы не только теоретически, но и геофизическими методами. Учёные на сегодняшний день знают, где в недрах Земли есть восходящий конвективный поток, а где – нисходящий. И, что самое интересное, эти потоки совпадают с определенными геологическими границами на поверхности Земли: под срединно-океаническими хребтами располагаются восходящие ветви конвективных потоков, а под зонами субдукции – нисходящие. Между ними находятся горизонтальные части потока. Таким образом было получено очень важное заключение, что восходящие ветви конвективного потока являются причиной выхода мантийного вещества на поверхность Земли и, как следствие, образования новой океанической коры в СОХ. Нисходящие потоки отлично совпадают с зонами субдукции, где литосферная плита затягивается в мантию. На основании этого можно утверждать, что мантийный конвективный поток является основной причиной движения литосферных плит – он утягивает за собой холодную жёсткую литосферу в мантию, а также способствует рождению новой океанической коры. Однако это не единственная причина движения плит. Новообразованная океаническая кора со временем уплотняется, охлаждается, а также становится более мощной за счёт активного осадконакопления в океане, что делает её более тяжелой, чем астеносфера и способствует затягиванию в мантию.

3.2. Внутриплитный магматизм

Литосферные плиты вовсе не являются абсолютно жёсткими, монолитными и недеформируемыми. Об этом свидетельствуют значительные внутриплитные проявления магматизма. Как правило, такие проявления описываются теорией плюмов или «горячих точек», предложенной Дж. Вилсоном и Дж. Морганом.

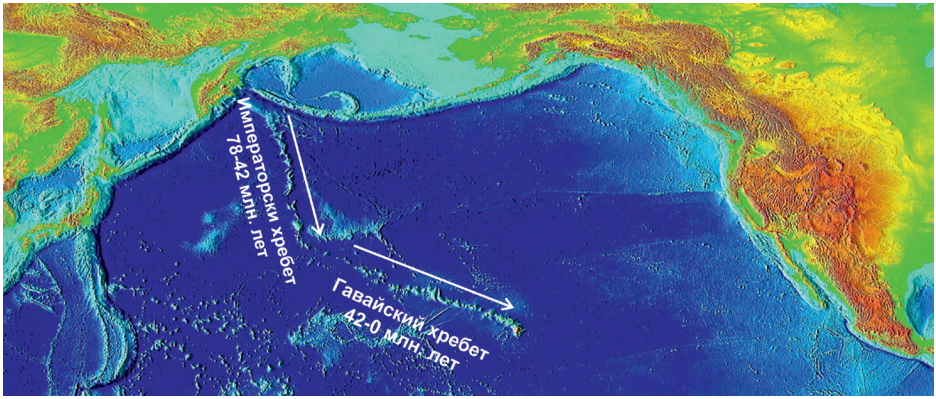

Рисунок 6

Императорский и Гавайский хребты в Тихом океане с указанным возрастом их образования

Данная теория заключается в объяснении существования горячих мантийных потоков, так называемых плюмов, движущихся от границы ядро-мантия к поверхности Земли, зачастую с огромной для геологических процессов скоростью. Достоверно не установлены взаимоотношения плюмов и конвективных потоков, однако учитывая тот факт, что плюмы достаточно стационарны (постоянны), можно предполагать, что их действие не связано с общей схемой конвективных ячеек внутри Земли и нарушает их. Проявление мантийного плюма на поверхности Земли заключается в том, что горячий поток, подходя к поверхности, плавит нижние слои земной коры, давая начало вулканизму. Учитывая тот факт, что плюмы действуют достаточно долго (до 150 млн лет) и являются стационарными, а литосферные плиты находятся в постоянном движении из-за вышеописанных процессов, на поверхности нашей планеты появляются интересные проявления поднимающихся мантийных струй – *горячие точки*. Самым ярким примером этого процесса являются Императорский и Гавайский хребты в Тихом океане (Рис. 6). Все эти острова обязаны своим происхождением действию одного и того же мантийного плюма, который действует уже больше 78 млн лет. При этом самый северный остров Императорского хребта является самым древним, и на нём отсутствуют активные проявления вулканизма на сегодняшний день, а самый южный – о. Гавайи является активным проявлением современного вулканизма. На примере цепочки этих островов можно увидеть, как за десятки миллионов лет над одним и тем же действующим плюмом появлялись всё новые и новые вулканические острова, а цепи этих островов вытягивались в сторону, обратную направлению движения Тихоокеанской плиты. Иначе говоря, мантийная струя вот уже 78 млн лет оставляет свой след в виде вулканических островов на движущейся над ней океанической плите. Так, например, можно утверждать, что в период 78-42 млн лет назад плита двигалась на север, а на рубеже 42 млн лет назад из-за сильного взаимодействия с соседними плитами она поменяла направление и стала двигаться на северо-запад.

Очевидно, что внутриплитный магматизм может происходить не только на океанической коре, образуя островные цепи, но и на континентальной. Это явление является одной из причин образования новой континентальной коры.

3.3. Образование континентальной коры

Мы уже узнали, что новая океаническая кора образуется в зонах спрединга, там, где мантийное вещество подходя близко к поверхности, формирует толщи основных и ультраосновных пород, которые становятся фундаментом для молодой коры. Теперь давайте разберемся как образуется континентальная кора.

В первый момент времени, при дифференциации Земли, континентальной коры не было. Предполагается, что первоначальная литосфера была представлена лишь основными горными породами и являлась океанической. Но в процессе движения плит и действия *интраокеанической* субдукции, когда одна океаническая плита погружалась под другую океаническую, в зоне субдукции в развитии процесса вулканизма появлялись все более кислые породы, образуя переходный тип коры – *субконтинентальный*. Субконтинентальная кора, по большому счету, выделяется в отдельный тип лишь по причине своей молодости (незрелости) и малой мощности в отличии от континентальной. Очевидно, что в процессе продолжительного магматизма вулканический остров, расположенный над зоной субдукции в океане становится микроконтинентом с полноценной зрелой континентальной корой, а позже – и полноценным континентом. Таким образом, при взаимодействии двух океанических плит, благодаря длительному процессу магматизма закладывается фундамент новой континентальной коры. А значит подобный, связанный с субдукцией, магматизм можно считать одной из причин образования молодой сиалической коры.

Такой механизм образования континентальной коры не является единственным. В процессе коллизии, когда сталкиваются два континента, в зоне сочленения также имеет место магматизм. При этом для этого магматизма характерно выплавление кислых пород, которые также способствуют росту континентальной коры.

Внутриплитный магматизм, возникающий из-за действия плюмов, о которых мы говорили ранее, также является важной причиной образования новой континентальной коры. В геологической истории Земли известны случаи, когда в процессе действия плюма под континентом, возникал сильнейший вулканизм, в ходе которого на поверхность Земли изливалось огромное количество расплавленного материала – миллионы кубических километров, образуя *траппы*.

Трапповый магматизм – особый тип внутриконтинентального магматизма, для которого характерен огромный объем излияния базальтов за достаточно короткое геологическое время. На океанической коре аналогом траппов можно считать *океанические плато*. Область распространения траппов принято называть *крупными изверженными провинциями*. Примером таких крупных изверженных провинций являются Сибирские траппы, которые образовывались примерно 250 млн лет назад и занимают большую часть Западно-Сибирской и Восточно-

Сибирской платформ. Масштабы магматизма, которому обязаны своим происхождением Сибирские траппы, настолько велики, что с ними связывают грандиозное вымирание на рубеже пермского и триасового периодов, при котором 96% всех морских видов и 73% всех наземных видов позвоночных прекратили своё существование.

3.4. Цикл Уилсона

Как Вы уже успели заметить, все описываемые процессы взаимосвязаны. Можно утверждать, что всё вещество Земли подвержено некому циклированию. Процесс взаимодействия блоков литосферы и его цикличность были установлены канадским геофизиком Джоном Тузо Уилсоном и сейчас называются «Циклом Уилсона» (Рис. 7).

Для того чтобы понять принцип предложенной Уилсоном концепции, рассмотрим следующую упрощенную последовательность: представим себе огром-

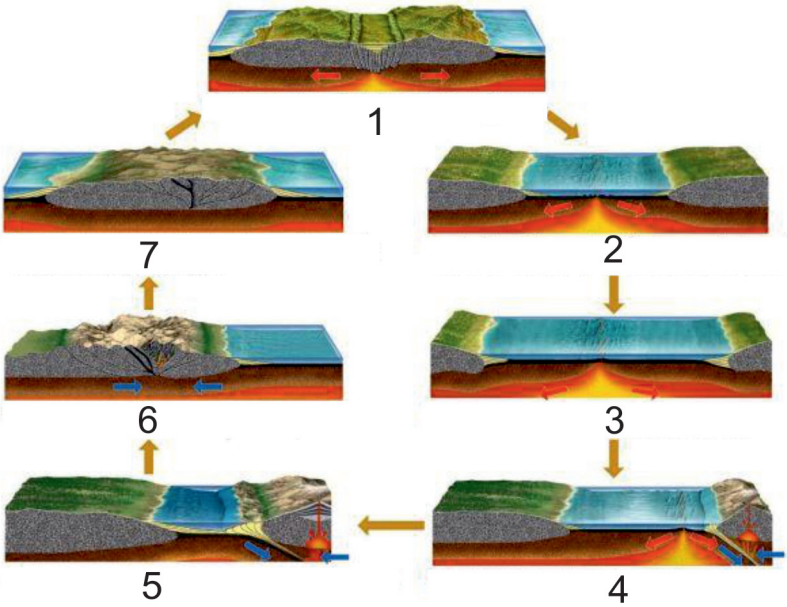

Рисунок 7

Схематичное изображение цикла Уилсона. По этапам: 1. Заложение рифта на континенте вследствие действия высокого теплового потока; 2. Зарождение нового океана; 3. Рост океанической коры, сопровождающийся постепенным охлаждением пассивных окраин и накоплением осадков на дне океана; 4. Заложение активной континентальной окраины и начало субдукции при столкновении двух континентальных блоков; 5. Активный рост континентальной коры, уменьшение объемы океанической коры; 6. Коллизия двух континентов с образованием единого суперконтинента; 7. Постепенная эрозия суперконтинента и, возможно, заложение нового континентального рифта

ный суперконтинент, существовавший в прошлом Земли, например, Пангея (250-200 млн лет назад). Цикл, предложенный Уилсоном включает в себя 7 этапов, которые происходят в течение 500-600 млн лет. В результате действия мантийных потоков в основании континента образуется сильно прогретая зона, и по ослабленным зонам фундамента начинает закладываться новый рифт. Этот процесс соответствует первому этапу цикла. В дальнейшем из рифта начинает формироваться молодая, маломощная океаническая кора, подобно Восточно-Африканскому рифту. Иными словами – континент раскалывается, а место раскола заполняется новым, растущим океаном. На третьем этапе происходит рост океана – постепенно увеличивается площадь океанической коры, образованной в зоне спрединга, начинают накапливаться осадки, пассивные окраины новых континентов отдаляются друг от друга. При этом части бывшего континента удаляются друг от друга ровно на столько, сколько новой океанической коры образовано в зоне спрединга (данный этап цикла Уилсона хорошо иллюстрируется на примере Красного моря, Атлантического океана). Этот процесс будет происходить до тех пор, пока один из новообразованных континентальных блоков, не столкнется с другим подобным блоком или зоной спрединга, что положит начало четвёртому этапу – формированию активной континентальной окраины с зоной субдукции. После формирования активной континентальной окраины сразу начинается пятый этап: в новообразованной зоне субдукции происходит поглощение океанической коры и образование континентальной. Начинается постепенное закрытие океана, которое заканчивается шестым этапом – коллизией пассивной и активной окраин, сопровождаемой активным горообразованием. Заключительный этап цикла – эрозия (разрушение) горной цепи, образованной на месте столкновения плит и, возможно, заложение нового рифта.

Согласно этой теории, один подобный цикл не превышает 500 млн лет. То есть всю историю Земли можно условно поделить на промежутки «от суперконтинента до суперконтинента», где один такой промежуток будет равен одному циклу Уилсона.

Список литературы

В приведенной ниже литературе Вы можете получить более подробные сведения по вопросам, которым посвящен данный блок. Источники, указанные в разделе «Дополнительная литература», позволят получить углубленное представление по отдельным темам блока.

Основная литература:

- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А., 2001. Глубинная геодинамика. Издательство СО РАН, филиал «Гео», Новосибирск, 408 с.
- Савцова Т.М., 2007. Общее землеведение. Учебное пособие. Издательство «Академия», Москва, 416 с.
- Соколовский А.К. (ред.), 2006. Общая геология: Учебник 2 Т. Издательство КДУ, Москва. Т.1: 448 с, Т.2: 208 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г., 2005. Геотектоника с основами геодинамики. Издательство КДУ, Москва, 520 с.

Дополнительная литература:

- Литасов Ю.Д., 2011. Вулканизм Земли и планет земной группы. Учебное пособие. Издательство НГУ, Новосибирск, 186 с.
- Хаин В.Е., 2000. Тектоника континентов и океанов. Издательство «Научный мир», Москва, 606 с.

В соответствующем разделе на сайте Геологического отделения Заочной школы Вы также можете ознакомиться с дополнительными материалами, которые существенно облегчат восприятие и понимание изложенного в данном блоке материала.

Задачи для самостоятельного решения

Часть 1

В данном блоке Вам предстоит дать короткий ответ на поставленный вопрос, опираясь на изученный материал.

1.1. Какой химический элемент является самым распространенным в земной коре?

1.2. Какие три главные геосферы Земли мы можем выделить?

1.3. Какие три подхода существуют при изучении глубинного строения Земли?

1.4. Как называется резкая сейсмическая граница между земной корой и мантией?

1.5. Как называются подводные горные сооружения, образованные в процессе океанического рифтогенеза?

1.6. В каких областях литосфера достигает наибольшей мощности?

1.7. Что является причиной того, что в Земле существуют конвективные потоки?

Часть 2

В данном блоке Вам предстоит дать развернутый ответ на поставленный вопрос (несколько предложений), опираясь на прочитанный материал и дополнительную литературу.

2.1. Как можно объяснить тот факт, что мелкие литосферные плиты расположены преимущественно в виде поясов вдоль границ более крупных литосферных плит?

2.2. Опираясь на численные значения, опишите принципиальные различия в составе ядра и литосферы.

2.3. Опираясь на формулу закона всемирного тяготения, объясните в чем заключается процесс аккреции, в ходе которого образовалась Земля и почему планеты Земной группы более плотные, нежели планеты внешней группы.

2.4. Известно, что возраст горных пород, встречающихся на поверхности Земли в разных районах, сильно различается. Под возрастом породы подразумевается время, прошедшее с момента её образования – обычно это миллионы или даже миллиарды лет. При этом древние породы встречаются существенно реже, чем молодые. Как Вы думаете, почему?

Часть 3

В данном блоке необходимо написать рассуждение-эссе на указанную тему. Для успешного выполнения задания необходимо предварительно ознакомиться с Интернет-ресурсами и литературой на соответствующую тему.

3.1. Ежегодно землетрясения наносят огромный ущерб человечеству, уносят много жизней. Известны случаи, когда жертвами землетрясений стали до 160 тыс. человек (Мессина 1908 г., Токио 1923 г.). Очевидно, что предсказание землетрясений с целью минимизации ущерба является важной задачей современных ученых. Приведите ответ на вопрос «Возможно ли предсказывать землетрясения и, если да, то как?». Подкрепите ответ фактами.

3.2. Известно, что вулканы распределены по поверхности Земли очень неравномерно, есть огромные территории – миллионы квадратных километров суши (или океанического дна), на которых нет ни одного вулкана, извергавшегося в историческое время (о которых сохранились упоминания в истории цивилизации). С другой стороны, на некоторых, иногда относительно небольших участках Земли, сконцентрированы десятки и даже сотни вулканов. Где на территории России известны вулканические провинции и отдельные вулканические центры? Перечислите их, дав каждому краткую характеристику – названия и высоту основных вулканов, дату и характер (количество излившейся лавы и опасность для населения) последнего извержения. Как Вы считаете, почему вулканическая активность проявлена именно в этих регионах? Возможно ли извержение вулкана в Вашем регионе? Обоснуйте свою точку зрения.