

## Глава. 16. Дрейф материков.

В главе 16 обсуждаются методы регистрации и результаты измерений современного дрейфа материков, в частности, РСДБ и GPS методы оценки скоростей дрейфа. Включен раздел, посвященный описанию лазерных деформографов и полученных на них результатов. Данные дрейфа материков представлены в контексте тектоники плит. Отмечаются успехи и ошибки этой теории.

### 16. 1. Радиointерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ).

Наиболее заметный прогресс в точных геодезических методах стал возможен благодаря интерферометрии внеземных сигналов, поступающих от «фиксированных» источников, настолько удаленных, что их собственное движение не может наблюдаться с Земли. Исследование радиоизлучения этих источников позволяет получить базисные линии (расстояния между станциями) очень большой длины и не требует при этом измерений элементов орбиты. Этот метод позволяет измерить базисную линию длиной в тысячи километров с точностью до нескольких сантиметров. К недостаткам метода относятся слабость сигнала и сложность его обработки. Источниками радиоизлучения служат квазары – наиболее удаленные от Земли астрономические объекты. Если известно направление на квазар, по разновременности поступления сигнала от квазара на две станции на Земле определяют длину базисной линии. Вследствие вращения Земли эта временная задержка изменяется вместе с изменением ориентировки базисной линии по отношению к поступающему сигналу. Наблюдаемая величина запаздывания сигнала может использоваться для высокоточного определения скорости вращения Земли.

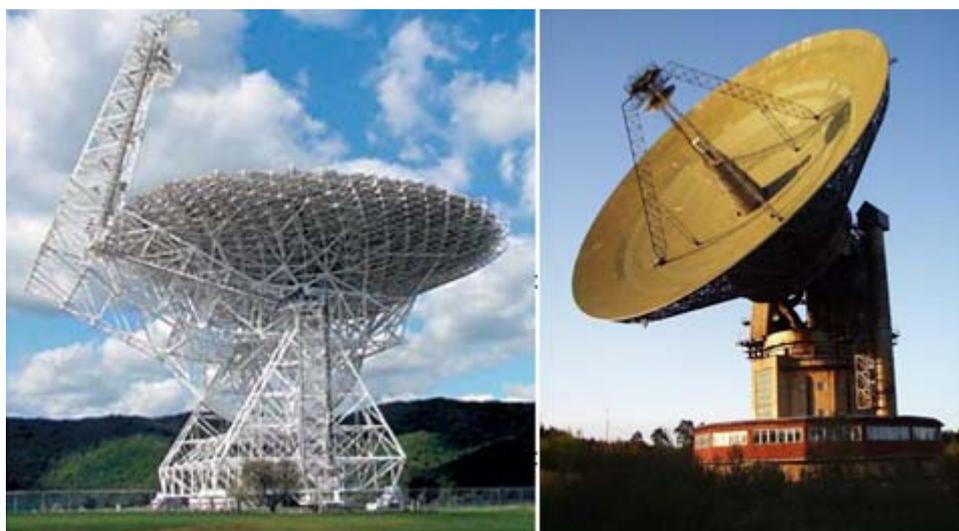


Рис. 16-1. Параболическая антенна обсерватории Грин-Бэнк (западная Виргиния, США). Зеркало размером 100×100м (слева). Радиотелескоп недалеко от Калязина (справа).

Другие геодинамические процессы, как, например, движение полюсов Земли и движение плит земной коры, существенно воздействуют на результаты длиннобазисной радиointерферометрии, изменяя ориентировку геоцентрической системы координат по отношению к инерциальному пространству, определяемому квазарами. Таким образом, РСДБ позволяет усовершенствовать геофизические модели этих процессов с помощью мониторинга (систематических измерений) длин базисных линий, соединяющих станции слежения. Например, если станции находятся на противоположных сторонах материка или океана, с помощью РСДБ выявляется движение континентальных плит (составляющее несколько сантиметров в год). Считается, что этот результат служит подтверждением гипотезы тектоники плит. Для геодезии особенно важно то, что РСДБ позволяет очень

жестко определить ориентировку опорной геодезической сети по отношению к небесной сфере. Однако необходимо учитывать погрешности, источниками которых являются движение полюсов, дрейф материков и изменения параметров вращения Земли.

По-видимому, первый результат по глобальному мониторингу дрейфа континентов был получен с применением радиотелескопов РСДБ направленных не на квазары, а на спутники системы Navy Navigation Satellite (Anderle, Malyevac, 1983). В статье (Kuznetsov, 1990) сравнивается направление дрейфа материков с вектором градиента высоты геоида. Показано, что наблюдается хорошее совпадение (больше половины из 20 точек наблюдений) направлений векторов скоростей дрейфа - с максимальным градиентом высот геоида (см. рис 16-2).

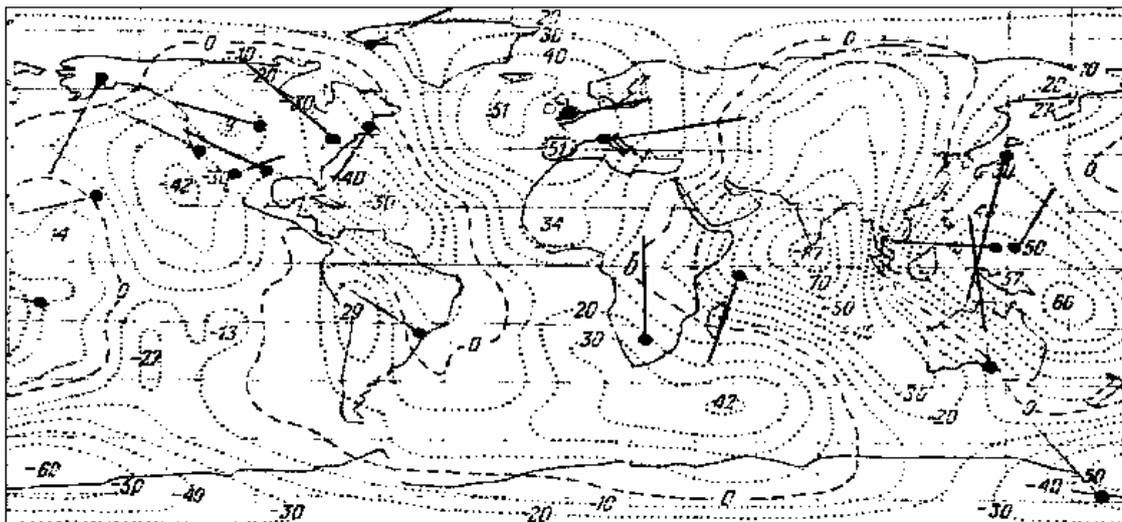


Рис. 16-2. Направления современных движений материков (Anderle, Malyevac, 1983) на карте высот геоида (в метрах) (Kuznetsov, 1990).

## 16. 2. Система Глобального Позиционирования (GPS - Global Positioning System).

Система является спутниковой и работает под управлением Министерства Обороны США. Система является глобальной, всепогодной и обеспечивает возможность получения точных координат и времени 24 часа в сутки (По материалам "Mapping Systems: General Reference, Trimble Navigation Limited, 1996").

Определение положения точек с помощью спутников. Появление искусственных спутников Земли произвело переворот в методах геодезии и значительно повысило точность навигации и определения положения точек и объектов на поверхности Земли. Большое преимущество, которое дает геодезии использование искусственных спутников, состоит в том, что спутник может синхронно наблюдаться с нескольких наземных станций, что позволяет определять их взаимное расположение. Сам спутник при этом может играть пассивную роль (например, отражая луч лазера, посланный с наземной станции, обратно на ту же станцию) или активную роль (непрерывно осуществляя передачу радиосигнала). На первых этапах развития космической геодезии сигналы подавались в виде вспышек света, которые фотографировались на фоне звезд одновременно с нескольких наземных пунктов, находящихся вне непосредственной видимости. Положение спутника на фотографии относительно опорных звезд давало возможность определить точное направление на него с данной станции наблюдения. Спутниковые системы позволяют наблюдателю, где бы он ни находился, точно определять свое местонахождение (например, Система глобального определения местоположения – Global Positioning System, GPS, использующая созвездие навигационных спутников NAVSTAR).

### **Основы системы GPS можно разбить на пять основных подпунктов:**

- \* Спутниковая трилатерация - основа системы.
- \* Спутниковая дальнометрия – измерение расстояний до спутников.
- \* Точная временная привязка – зачем нужно согласовывать часы в приёмнике и на спутнике и для чего требуется 4-й космический аппарат.
- \* Расположение спутников – определение точного положения спутников в космосе.
- \* Коррекция ошибок – учёт ошибок вносимых задержками в тропосфере и ионосфере.

### **Спутниковая трилатерация**

Точные координаты могут быть вычислены для места на поверхности Земли по измерениям расстояний от группы спутников (если их положение в космосе известно). В этом случае спутники являются пунктами с известными координатами. Предположим, что расстояние от одного спутника известно, и мы можем описать сферу заданного радиуса вокруг него.

Если мы знаем также расстояние и до второго спутника, то определяемое местоположение будет расположено где-то в круге, задаваемом пересечением двух сфер.

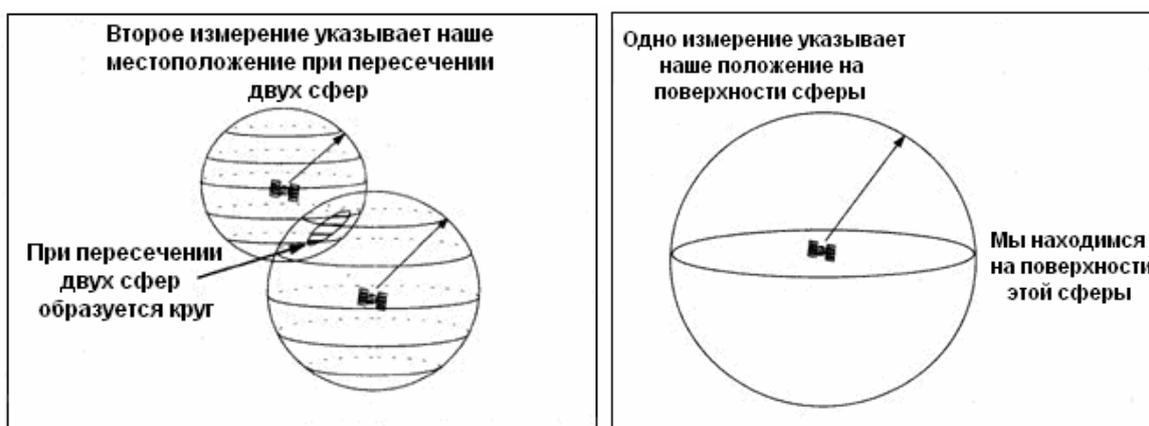


Рис. 16-3-а и Рис.16-3-б

Третий спутник определяет две точки на окружности.

Теперь остаётся только выбрать правильную точку. Однако одна из точек всегда может быть отброшена, так как она имеет высокую скорость перемещения или находится на ,или - под поверхностью Земли. Таким образом, зная расстояние до трёх спутников, можно вычислить координаты определяемой точки.

### **Спутниковая дальнометрия.**

Расстояние до спутников определяется по измерениям времени прохождения радиосигнала от космического аппарата до приёмника умноженным на скорость света. Для того, чтобы определить время распространения сигнала нам необходимо знать когда он покинул спутник.

Для этого на спутнике и в приёмнике одновременно генерируется одинаковый Псевдслучайный Код\*. Большинство гражданских пользователей используют C/A код при работе с GPS системами. Некоторые приёмники Trimble геодезического класса работают с P-кодом.

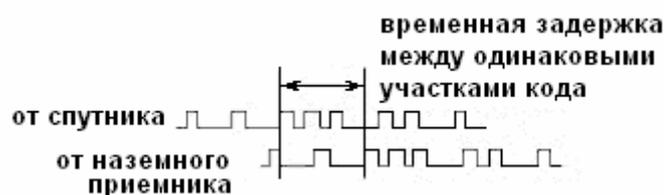


Рис. 16-3-в

-----  
 \* - Каждый спутник GPS передаёт два радиосигнала: на частоте  $L1=1575.42$  МГц и  $L2=1227.60$  МГц. Сигнал  $L1$  имеет два дальномерных кода с псевдослучайным шумом (PRN), P-код и C/A код. “Точный” или P-код может быть зашифрован для военных целей. “Грубый” или C/A код не зашифрован. Сигнал  $L2$  модулируется только с P-кодом. Приёмник проверяет входящий сигнал со спутника и определяет когда он генерировал такой же код. Полученная разница, умноженная на скорость света ( $\sim 300000$  км/с) даёт искомое расстояние.

Использование кода позволяет приёмнику определить временную задержку в любое время. Кроме того, спутники могут излучать сигнал на одной и той же частоте, так как каждый спутник идентифицируется по своему Псевдослучайному коду (PRN или PseudoRandom Number code).

**Точная временная привязка.**

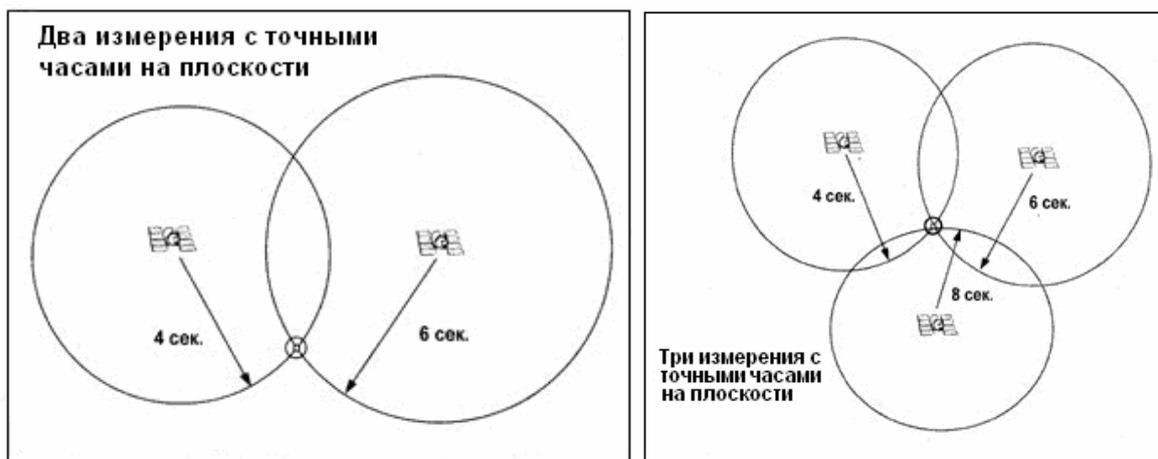


Рис. 16-3-г и Рис. 16-3-д

Как видно из сказанного выше, вычисления напрямую зависят от точности хода часов. Код должен генерироваться на спутнике и приёмнике в одно и то же время. На спутниках установлены атомные часы имеющие точность около одной наносекунды. Однако это слишком дорого, чтобы устанавливать такие часы в каждый GPS приёмник, поэтому измерения от четвёртого спутника используются для устранения ошибок хода часов приёмника.

Эти измерения можно использовать для устранения ошибок, которые возникают, если часы на спутнике и в приёмнике не синхронизированы. Для наглядности, иллюстрации, приведённые ниже, рассматривают ситуацию на плоскости, так как только три спутника необходимо для вычисления местоположения объекта.

Если часы на спутнике и в приёмнике имеют одинаковую точность хода, то точное местоположение может быть найдено по измерениям расстояния до двух спутников.

Если получены измерения с трёх спутников и все часы точные, то круг описанный радиус-вектором от третьего спутника будет пересекаться как показано на рисунке.

Однако если часы в приёмнике спешат на 1 секунду, то картина будет выглядеть следующим образом.

Если сделать замер до третьего спутника, то полученный радиус-вектор не пересечётся с двумя другими как показано на рисунке.

Когда GPS приёмник получает серию измерений которые не пересекаются в одной точке, то компьютер в приёмнике начинает вычитать (или добавлять) время методом последовательных итерации до тех пор, пока не сведёт все измерения к одной точке. После этого вычисляется поправка и делается соответствующее уравнивание.

Если вам требуется третье измерение, то необходим четвёртый спутник для устранения ошибок хода часов в приёмнике. Таким образом, при работе в поле вам необходимо иметь минимум четыре спутника, чтобы определить трёхмерные координаты объекта.

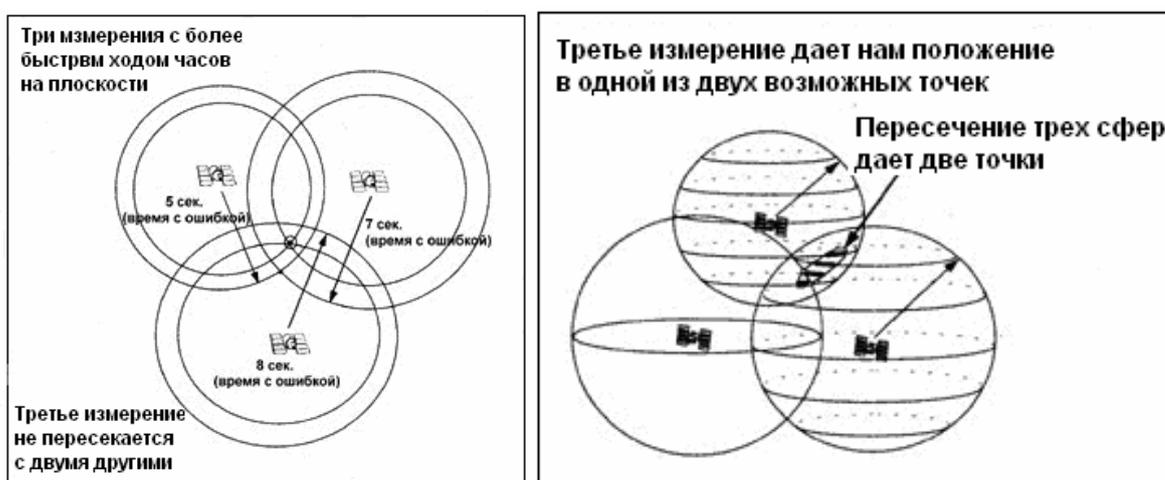


Рис. 16-3-е и Рис. 16-3-ж

### **Расположение спутников.**

Система NAVSTAR имеет 24 рабочих спутника с орбитальным периодом в 12 часов на высоте примерно 20200 км от поверхности Земли. В шести различных плоскостях имеющих наклон к экватору в  $55^\circ$ , расположено по 4 спутника. Указанная высота необходима для обеспечения стабильности орбитального движения спутников и уменьшения фактора влияния сопротивления атмосферы.

Министерство Обороны США (DoD) осуществляет непрерывное слежение за спутниками. На каждом спутнике расположено несколько высокоточных атомных часов и они непрерывно передают радиосигналы с собственным уникальным идентификационным кодом\*. МО США имеет 4 станции слежения за спутниками, три станции связи и центр, осуществляющий контроль и управление за всем наземным сегментом системы. Станции слежения непрерывно отслеживают спутники и передают данные в центр управления. В центре управления вычисляются уточнённые элементы спутниковых орбит и коэффициенты поправок спутниковых шкал времени, после чего эти данные передаются по каналам станций связи на спутники по крайней мере один раз в сутки.

Каждый спутник GPS передаёт два радиосигнала: на частоте  $L_1=1575.42$  МГц и  $L_2=1227.60$  МГц. Сигнал  $L_1$  имеет два дальномерных кода с псевдослучайным шумом (PRN), P-код и C/A код. “Точный” или P-код может быть зашифрован для военных целей. “Грубый” или C/A код не зашифрован. Сигнал  $L_2$  модулируется только с P-кодом.



Рис. 16-3-з

Большинство гражданских пользователей используют C/A код при работе с GPS системами. Некоторые приёмники Trimble геодезического класса работают с P-кодом.

### ***Коррекция ошибок.***

Некоторые источники ошибок возникающих при работе GPS являются трудно устранимыми. Вычисления предполагают, что сигнал распространяется с непрерывной скоростью, которая равна скорости света. Однако в реальности всё гораздо сложнее. Скорость света является константой только в вакууме. Когда сигнал проходит через ионосферу (слой заряженных частиц на высоте 130-290 км) и тропосферу, его скорость распространения уменьшается, что приводит к ошибкам в измерения дальности. В современных GPS приёмниках используют всевозможные алгоритмы устранения этих задержек.

Иногда возникают ошибки в ходе атомных часов и орбитах спутников, но они обычно незначительны и тщательно отслеживаются со станций слежения.

Многолучевая интерференция также вносит ошибки в определение местоположения с помощью GPS. Это происходит, когда сигнал отражается от объектов расположенных на земной поверхности, что создаёт заметную интерференцию с сигналами приходящими непосредственно со спутников. Специальная техника обработки сигнала и продуманная конструкция антенн позволяет свести к минимуму этот источник ошибок.

Обычно измеряют расстояние между наземным пунктом и спутником и скорость изменения этого расстояния при прохождении спутника. Расстояния рассчитывают, исходя из времени, которое затрачивает электромагнитный сигнал (лазерная вспышка или радиоимпульс) на прохождение пути от спутника до принимающей станции, при условии, что скорость движения сигнала известна. Вводятся поправки за атмосферную задержку сигнала и рефракцию. Скорость изменения расстояния между спутником и принимающей станцией определяется по величине наблюдаемого доплеровского сдвига частоты – изменения частоты сигнала, поступающего со спутника. Еще одна группа спутниковых наблюдений основана на принципе интерферометрии (т.е. наложения волн), когда радиоимпульс принимается в двух пунктах на земной поверхности и определяется время его запаздывания в одном пункте по отношению к другому. По величине этой задержки и известной скорости распространения волны с учетом угла подхода (который рассчитывается на основе известных параметров орбиты спутника) вычисляется расстояние между двумя пунктами. Наблюдения нескольких спутников позволяют также точно определить направление базисной линии, соединяющей наземные станции.

### **Пример использования GPS-системы.**

GPS состоит из трех частей: 18 рабочих искусственных спутников, размещенных симметрично на круговых орбитах, системы управления и пользователей. Каждый спутник в этой системе снабжен микропроцессором для обработки данных, приемником и передатчиком для связи с наземной системой управления и для передачи функциональных сигналов пользователям, несколькими атомными часами для определения точного времени. Энергоснабжение спутника осуществляется двумя большими солнечными батареями. Система управления объединяет операторов и наблюдателей станций слежения, рассредоточенных по всей планете. Они определяют орбиты спутников, постоянно контролируют функционирование их систем и точность хода часов и передают информацию на спутники для ретрансляции ее пользователям, имеющим специальный приемник, преобразующий сообщения со спутников в информацию о координатах. Приемное устройство состоит из антенны, источника энергии, процессора с несколькими каналами ввода для приема различных сигналов со спутника, записывающего устройства для хранения обработанных данных и приборов, дающих возможность считывания информации пользователем.

БиБиСи сообщает, что группа учёных из графства Ноттингем, Великобритания, использует GPS для определения уровня моря и изучения дрейфа материков. В проекте участвуют пятьдесят станций, разбросанных по всей Великобритании, и практически незаметное движение материков определяется по изменению расстояний между станциями и их высоты над уровнем моря. Это даёт учёным возможность прогнозировать местоположение острова на тысячелетия вперёд. Они обнаружили, в частности, что Британские острова наклоняются – северная часть поднимается, а южная, наоборот, опускается в море (рис. 16-4).



Рис. 11-4. (BBC NEWS 4 June, 2003, 09:28 GMT 10:28 UK)

### **11. 3. Наблюдения деформаций земной поверхности.**

Под действием приливных сил отдельные регионы земной поверхности растягиваются, другие - сжимаются. Величину таких деформаций можно измерить с помощью приборов, которые называются экстенсometрами (деформографами). В распоряжении отдела гравитационных измерений ГАИШ имеется лазерный деформограф, смонтированный в штольне Баксанской обсерватории ГАИШ. Он предназначен для обнаружения возможного проявления гравитационных волн, пришедших из далекого Космоса. Но на него, в первую очередь, влияют приливные деформации земной коры, которые в значительной степени зависят от локальных особенностей местных условий (от геологии).

### Лазерные деформографы.

Лазерный деформограф является оптическим прибором, предназначенным для регистрации микродеформаций земной коры в низком и сверхнизком диапазоне частот. Оптическая часть всех лазерных измерителей деформации собрана на основе модифицированного интерферометра Майкельсона с системой электронной регистрации изменения разности длин плеч интерферометра. Блок-схема оптико-механической части лазерного деформографа представлена на рисунке 16-5. Деформограф включает в себя источник когерентного излучения – частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер «ЛГН-303М» с долговременной стабильностью  $10^{-10}$ - $11^{-11}$  и длиной волны 0.63 мкм, коллиматор и интерференционный узел: полупрозрачная плоскопараллельная делительная пластина, плоскопараллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, лучевод, уголковый отражатель и фотодиод с электронным блоком регистрации.

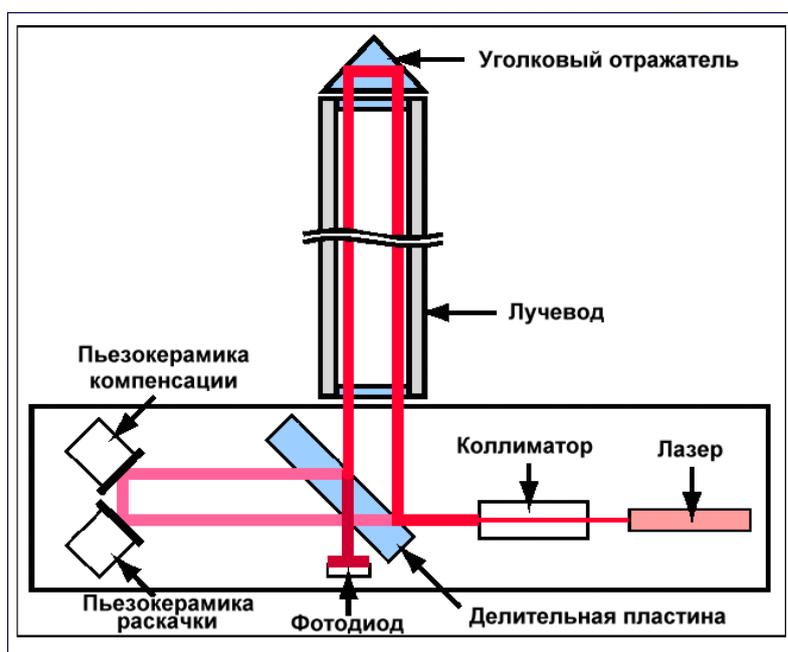


Рис. 16-5. Блок-схема оптико-механической части лазерного деформографа.

Элементы, ответственные за формирование интерференционной картины, расположены на едином жестком основании П-образного профиля – оптической скамье. Оптическая скамья выполнена из материала, обладающего малым коэффициентом теплового расширения (инвар). Уголковй отражатель и оптическая скамья жестко закреплены на массивных бетонных блоках, имеющих хороший контакт с коренными породами. Лучевод, в котором проходит лазерный луч, выполнен из трубы нержавеющей стали. Лучевод закреплен на стойках и предусмотрено его перемещение в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Лазерный деформограф использует интерференционный метод измерения расстояния, в основе которого лежит разница длин пробега луча по дистанции оптической скамьи и дистанции измерения. Луч лазера, пройдя коллиматор, попадает в интерференционный узел, где разделяется на полупрозрачном зеркале на два луча. Луч №1 направляется по лучеводу на уголкового отражателя, от которого возвращается на полупрозрачное зеркало. Луч №2, пройдя интерференционный узел, возвращается на полупрозрачное зеркало. Возвращенные лучи сбиваются на полупрозрачном зеркале в одной точке, образуя интерференционную картину, вариации которой регистрируются фотодиодом.

Принцип регистрации изменений интерференционной картины- компенсационный, позволяющий удерживать интерференционную картину неизменной. Цепь компенсации является и выходом сигнала деформации, который пропорционален величине деформации. Известно, что количество максимумов интерференционной картины бесконечно, поэтому шкала прибора условно делится на отрезки  $\pm\lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны лазера. Если деформация превышает диапазон  $\pm\lambda/2$ , на зеркало-компенсатор подается сигнал смещения шкалы, благодаря которому интерференционная картина с одного максимума перескакивает на соседний, что учитывается при проведении измерений. Таким образом, суммарная деформация определяется формулой:

$$\Delta L = \left[ (k_- - k_+) + \frac{U_2 - U_1}{U_{\lambda/2}} \right]$$

где  $k_+$  и  $k_-$  - число сбросов положительной и отрицательной полярности, возникающих при изменениях превышающих  $\Delta L$  на величину, равную  $\pm\lambda/2$ ;  $U_{\lambda/2}$  – нормирующий множитель в вольтах;  $U_1, U_2$  – значения выходного напряжения в начальный и конечный моменты времени.

#### 16. 4. Тектоника плит.

Основой теоретической геологии начала XX века была контракционная гипотеза. Земля остывает подобно испечённому яблоку, и на ней появляются морщины в виде горных хребтов. Развивала эти идеи теория геосинклиналей, созданная на основании изучения складчатых сооружений. Эта теория была сформулирована Джеймсом Даной, который добавил к контракционной гипотезе принцип изостазии. Согласно этой концепции Земля состоит из гранитов (континенты) и базальтов (океаны). При сжатии Земли в океанах-впадинах возникают тангенциальные силы, которые давят на континенты. Последние вздымаются в горные хребты, а затем разрушаются. Материал, который получается в результате разрушения, откладывается во впадинах.

Немецкий учёный-метеоролог Альфред Вегенер выступил на собрании Немецкого геологического общества с докладом о дрейфе материков против этой схемы. Исходной посылкой к созданию теории стало совпадение очертаний западного побережья Африки и восточного Южной Америки. Если эти континенты сдвинуть, то они совпадают, как если бы образовались в результате раскола одного праматерика.

Вегенер не удовлетворился совпадением очертаний побережий (которые неоднократно замечались до него), а стал интенсивно искать доказательства теории. Для этого он изучил геологию побережья обоих континентов и нашёл множество схожих геологических комплексов, которые совпадали при совмещении, так же, как и береговая линия. Другим направлением доказательства теории стали палеоклиматические реконструкции, палеонтологические и биогеографические аргументы. Многие животные и растения имеют ограниченные ареалы, по обе стороны Атлантического океана. Они очень схожи, но разделены многокилометровым водным пространством, и трудно предположить, что они пересекли океан.

Кроме того, Вегенер стал искать геофизические и геодезические доказательства. Однако в то время уровень этих наук был явно не достаточен, чтобы зафиксировать современное движение континентов. В 1930 году Вегенер погиб во время экспедиции в Гренландии, но перед смертью уже знал, что научное сообщество не приняло его теорию.

Изначально *теория дрейфа материков* было принята научным сообществом благосклонно, но в 1922 году она подверглась жёсткой критике со стороны сразу нескольких известных специалистов. Главным аргументом против теории стал вопрос о силе, которая двигает плиты. Вегенер полагал, что континенты двигаются по базальтам океанического дна, но для этого требовалось огромное усилие, и источника этой силы никто назвать не мог. В качестве источника движения плит предлагались сила Кориолиса,

приливные явления и некоторые другие, однако простейшие расчёты показывали, что всех их абсолютно недостаточно для перемещения огромных континентальных блоков.

Критики теории Вегенера поставили во главу угла вопрос о силе,двигающей континенты, и проигнорировали всё множество фактов, безусловно подтверждавших теорию. По сути, они нашли единственный вопрос, в котором новая концепция была бессильна, и без конструктивной критики отвергли основные доказательства. После смерти Альфреда Вегенера теория дрейфа материков была отвергнута, получив статус маргинальной науки, и подавляющее большинство исследований продолжали проводиться в рамках теории геосинклиналей. Правда, и ей пришлось искать объяснения истории расселения животных на континентах. Для этого были придуманы сухопутные мосты, соединявшие континенты, но погружившиеся в морскую пучину. Это было ещё одно рождение легенды об Атлантиде. Стоит отметить, что некоторые учёные не признали вердикт мировых авторитетов и продолжили поиск доказательств движения материков. Так дю Туа (Alexander du Toit) объяснял образование гималайских гор столкновением Индостана и Евразийской плиты.

Вялотекущая борьба фиксистов, как называли сторонников отсутствия значительных горизонтальных перемещений, и мобилистов, утверждавших, что континенты всё-таки движутся, с новой силой разгорелась в 1960-х годах, когда в результате изучения дна океанов были найдены ключи к пониманию «машин» под названием Земля.

К началу 1960-х годов была составлена карта рельефа дна Мирового океана, которая показала, что в центре океанов расположены срединно-океанические хребты, которые возвышаются на 1,5—2 км над абиссальными равнинами, покрытыми осадками. Эти данные позволили Р. Дицу и Гарри Хессу в 1962—1963 годах выдвинуть гипотезу спрединга. Согласно этой гипотезе, в мантии происходит конвекция со скоростью около 1 см/год. Восходящие ветви конвекционных ячеек выносят под срединно-океаническими хребтами мантийный материал, который обновляет океаническое дно в осевой части хребта каждые 300—400 лет. Континенты не плывут по океанической коре, а перемещаются по мантии, будучи пассивно «впяны» в литосферные плиты. Согласно концепции спрединга, океанические бассейны структуры непостоянные, неустойчивые, континенты же — устойчивые.

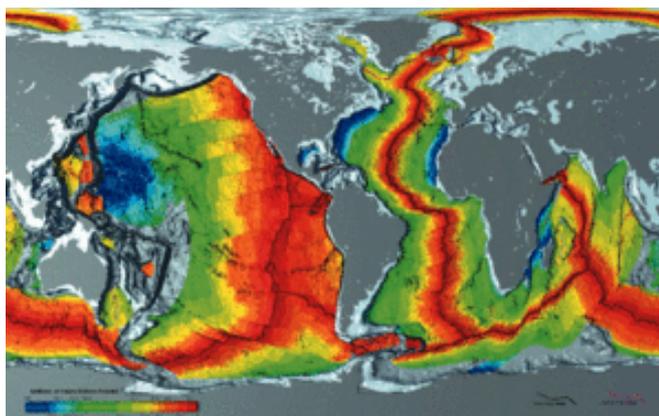


Рис. 16-6. Возраст дна океанов (красный цвет соответствует молодой коре).

В 1963 году гипотеза спрединга получает мощную поддержку в связи с открытием полосовых магнитных аномалий океанического дна. Они были интерпретированы как запись инверсий магнитного поля Земли, зафиксированная в намагниченности базальтов дна океана. После этого тектоника плит начала победное шествие в науках о Земле. Всё больше учёных понимали, что, чем тратить время на защиту концепции фиксизма, лучше взглянуть на планету с точки зрения новой теории и, наконец-то, начать давать реальные объяснения сложнейшим земным процессам.

Сейчас тектоника плит подтверждена прямыми измерениями скорости плит методом интерферометрии излучения от далёких квазаров и измерениями с помощью спутниковых навигационных систем GPS. Результаты многолетних исследований полностью подтвердили основные положения теории тектоники плит.

**Современное состояние тектоники плит.** Сейчас уже нет сомнений, что горизонтальное движение плит происходит за счёт мантийных теплогравитационных течений — конвекции. Источником энергии для этих течений служит разность температуры центральных областей Земли, которые имеют очень высокую температуру (по оценкам, температура ядра составляет порядка 5000 °C) и температуры на её поверхности. Нагретые в центральных зонах Земли породы расширяются (термическое расширение), плотность их уменьшается, и они всплывают, уступая место опускающимся более холодными и потому более тяжёлым массам, уже отдавшим часть тепла земной коре. Этот процесс переноса тепла (следствие всплывания лёгких, горячих масс и погружения тяжёлых, более холодных масс) идёт непрерывно, в результате чего возникают конвективные потоки. Эти потоки — течения замыкаются сами на себя и образуют устойчивые конвективные ячейки, согласующиеся по направлениям потоков с соседними ячейками. При этом в верхней части ячейки течение вещества происходит почти в горизонтальной плоскости, и именно эта часть течения увлекает плиты в горизонтальном же направлении с огромной силой за счёт огромной вязкости мантийного вещества. Если бы мантия была совершенно жидкой — вязкость пластичной мантии под корой была бы малой (скажем, как у воды или около того), то через слой такого вещества с малой вязкостью не могли бы проходить поперечные сейсмические волны. А земная кора увлекалась бы потоком такого вещества со сравнительно малой силой. Но, благодаря высокому давлению, при относительно низких температурах, господствующих на поверхности Мохо и ниже, вязкость мантийного вещества здесь очень велика (так что в масштабе лет вещество мантии Земли жидкое (текущее), а в масштабе секунд — твёрдое).

Движущей силой течения вязкого мантийного вещества непосредственно под корой является перепад высот свободной поверхности мантии между областью подъёма и областью опускания конвекционного потока. Этот перепад высот, можно сказать, величина отклонения от изостазии, образуется из-за разной плотности чуть более горячего (в восходящей части) и чуть более холодного вещества, поскольку вес более и менее горячего столбов в равновесии одинаков (при разной плотности!). На самом же деле, положение свободной поверхности не может быть измерено, оно может быть только вычислено (высота поверхности Мохо + высота столба мантийного вещества, по весу эквивалентного слою более лёгкой коры над поверхностью Мохо). Эта же движущая сила (перепада высот) определяет степень упругого горизонтального сжатия коры силой вязкого трения потока о земную кору. Величина этого сжатия мала в области восхождения мантийного потока и увеличивается по мере приближения к месту опускания потока (за счёт передачи напряжения сжатия через неподвижную твёрдую кору по направлению от места подъёма к месту спуска потока). Над опускающимся потоком сила сжатия в коре так велика, что время от времени превышает прочность коры (в области наименьшей прочности и наибольшего напряжения), происходит неупругая (пластическая, хрупкая) деформация коры — землетрясение. При этом из места деформации коры выдавливаются целые горные цепи, например, Гималаи. При пластической (хрупкой) деформации очень быстро (в темпе смещения коры при землетрясении) уменьшается и напряжение в ней — сила сжатия в очаге землетрясения и его окрестностях. Но сразу же по окончании неупругой деформации продолжается прерванное землетрясением очень медленное нарастание напряжения (упругой деформации) за счёт очень медленного же движения вязкого мантийного потока, начиная цикл подготовки следующего землетрясения.

Таким образом, движение плит — следствие переноса тепла из центральных зон Земли очень вязкой магмой. При этом часть тепловой энергии превращается в

механическую работу по преодолению сил трения, а часть, пройдя через земную кору, излучается в окружающее пространство. Так что наша планета в некотором смысле представляет собой тепловой двигатель.

Относительно причины высокой температуры недр Земли существует несколько гипотез. В начале XX века была популярна гипотеза радиоактивной природы этой энергии. Казалось, она подтверждалась оценками состава верхней коры, которые показали весьма значительные концентрации урана, калия и других радиоактивных элементов, но впоследствии выяснилось, что содержания радиоактивных элементов в породах земной коры совершенно недостаточно для обеспечения наблюдаемого потока глубинного тепла. А содержание радиоактивных элементов в подкоровом веществе (по составу близком к базальтам океанического дна), можно сказать, ничтожно. Однако это не исключает достаточно высокого содержания тяжелых радиоактивных элементов, генерирующих тепло, в центральных зонах планеты.

Другая модель объясняет нагрев химической дифференциацией Земли. Первоначально планета была смесью силикатного и металлического веществ. Но одновременно с образованием планеты началась её дифференциация на отдельные оболочки. Более плотная металлическая часть устремилась к центру планеты, а силикаты концентрировались в верхних оболочках. При этом потенциальная энергия системы уменьшалась и превращалась в тепловую энергию. Другие исследователи полагают, что разогрев планеты произошёл в результате аккреции при ударах метеоритов о поверхность зарождающегося небесного тела. Это вряд ли — при аккреции тепло выделялось практически на поверхности, откуда оно легко уходило в космос, а не в центральные области Земли.

***Второстепенные силы.*** Сила вязкого трения, возникающая вследствие тепловой конвекции, играет определяющую роль в движениях плит, но кроме неё на плиты действуют и другие, меньшие по величине, но также важные силы. Это - силы Архимеда, обеспечивающие плавание более лёгкой коры на поверхности более тяжёлой мантии. Приливные силы, обусловленные гравитационным воздействием Луны и Солнца (различием их гравитационного воздействия на разно удаленные от них точки Земли). А также силы, возникающие вследствие изменения атмосферного давления на различные участки земной поверхности — силы атмосферного давления достаточно часто изменяются на 3 %, что эквивалентно сплошному слою воды толщиной 0.3 м (или гранита толщиной не менее 10 см). Причём это изменение может происходить в зоне шириной в сотни километров, тогда как изменение приливных сил происходит более плавно — на расстояниях в тысячи километров.

***Дивергентные границы или границы раздвижения плит.*** Это границы между плитами,двигающимися в противоположные стороны. В рельефе Земли эти границы выражены рифтами, в них преобладают деформации растяжения, мощность коры пониженная, тепловой поток максимален, и происходит активный вулканизм. Если такая граница образуется на континенте, то формируется континентальный рифт, который в дальнейшем может превратиться в океанический бассейн с океаническим рифтом в центре. В океанических рифтах в результате спрединга формируется новая океаническая кора.

***Океанические рифты.*** На океанической коре рифты приурочены к центральным частям срединно-океанических хребтов. В них происходит образование новой океанической коры. Общая их протяжённость более 60 тысяч километров. К ним приурочено множество гидротермальных источников, которые выносят в океан значительную часть глубинного тепла, и растворённых элементов. Высокотемпературные источники называются чёрными курильщиками, с ними связаны значительные запасы цветных металлов.

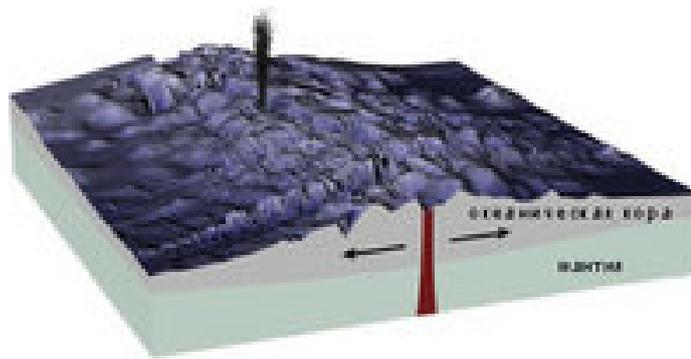


Рис. 16- 7. Схема строения срединно-океанического хребта

**Континентальные рифты.** Раскол континента на части начинается с образования рифта. Кора утончается и раздвигается, начинается магматизм. Формируется протяжённая линейная впадина глубиной порядка сотен метров, которая ограничена серией сбросов. После этого возможно два варианта развития событий: либо расширение рифта прекращается и он заполняется осадочными породами, превращаясь в авлакоген, либо континенты продолжают раздвигаться и между ними, уже в типично океанических рифтах, начинает формироваться океаническая кора.

**Конвергентные границы.** Конвергентными называются границы, на которых происходит столкновение плит. Возможно три варианта:

- Континентальная плита с океанической. Океаническая кора плотнее, чем континентальная и погружается под континент в зоне субдукции.
- Океаническая плита с океанической. В таком случае одна из плит заползает под другую и также формируется зона субдукции, над которой образуется островная дуга.
- Континентальная плита с континентальной. Происходит коллизия, возникает мощная складчатая область. Классический пример — Гималаи.

В редких случаях происходит надвигание океанической коры на континентальную - обдукция. Благодаря этому процессу возникли офиолиты Кипра, Новой Каледонии, Омана и другие.

В зонах субдукции поглощается океаническая кора, и тем самым компенсируется её появление в СОХах. В них происходят исключительно сложные процессы, взаимодействия коры и мантии. Так океаническая кора может затягивать в мантию блоки континентальной коры, которые по причине низкой плотности эксгумируются обратно в кору. Так возникают метаморфические комплексы сверхвысоких давлений, один из популярнейших объектов современных геологических исследований.

Большинство современных зон субдукции расположены по периферии Тихого океана, образуя тихоокеанское огненное кольцо. Процессы, идущие в зоне конвергенции плит, по праву считаются одними из самых сложных в геологии. В ней смешиваются блоки разного происхождения, образуя новую континентальную кору.

**Активные континентальные окраины.** Активная континентальная окраина возникает там, где под континент погружается океаническая кора. Эталоном этой геодинамической обстановки считается западное побережье Южной Америки, её часто называют *андийским* типом континентальной окраины. Для активной континентальной окраины характерны многочисленные вулканы и вообще мощный магматизм. Расплавы имеют три компонента: океаническую кору, мантию над ней и низы континентальной коры.

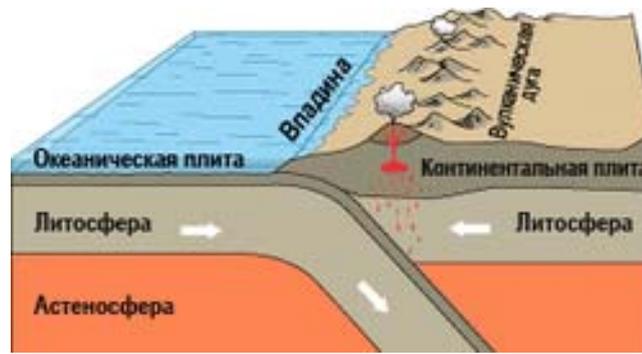


Рис. 16-8. Активная континентальная окраина.

Под активной континентальной окраиной происходит активное механическое взаимодействие океанической и континентальной плит. В зависимости от скорости, возраста и мощности океанической коры возможны несколько сценариев равновесия. Если плита движется медленно и имеет относительно малую мощность, то континент соскабливает с неё осадочный чехол. Осадочные породы сминаются в интенсивные складки, метаморфизуются и становятся частью континентальной коры. Образующая при этом структура называется *аккреционным клином*. Если скорость погружающейся плиты высока, а осадочный чехол тонок, то океаническая кора стирает низ континента и вовлекает его в мантию.

**Островные дуги.** Островные дуги — это цепочки вулканических остров над зоной субдукции, возникающие там, где океаническая плита погружается под океаническую. В качестве типичных современных островных дуг можно назвать Алеутские, Курильские, Марианские острова, и многие другие архипелаги. Японские острова также часто называют островной дугой, но их фундамент очень древний и на самом деле они образованы несколькими разновременными комплексами островных дуг, так что Японские острова являются микроконтинентом.

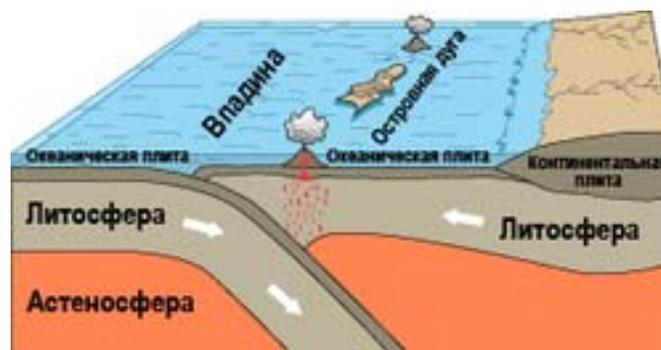


Рис. 16-9. Островная дуга.

Островные дуги образуются при столкновении двух океанических плит. При этом одна из плит оказывается снизу и поглощается в мантию. На верхней же плите образуются вулканы островной дуги. Выгнутая сторона островной дуги направлена в сторону поглощаемой плиты. С этой стороны находятся глубоководный желоб и преддуговой прогиб.

За островной дугой расположен задуговый бассейн (типичные примеры: Охотское море, Южно-Китайское море и т.д.) в котором также может происходить спрединг.

**Коллизия континентов.** Столкновение континентальных плит приводит к смятию коры и образованию горных цепей. Примером коллизии является Альпийско-Гималайский горный пояс, образовавшийся в результате закрытия океана Тетис и столкновения с Евразийской плитой Индостана и Африки. В результате мощность коры значительно увеличивается, под Гималаями она составляет 70 км. Это неустойчивая структура, она интенсивно разрушается поверхностной и тектонической эрозией. В коре с резко увеличенной мощностью идёт выплавка гранитов из метаморфизованных осадочных и магматических пород. Так образовались крупнейшие батолиты, например, Ангаро-Витимский и Зерендинский.

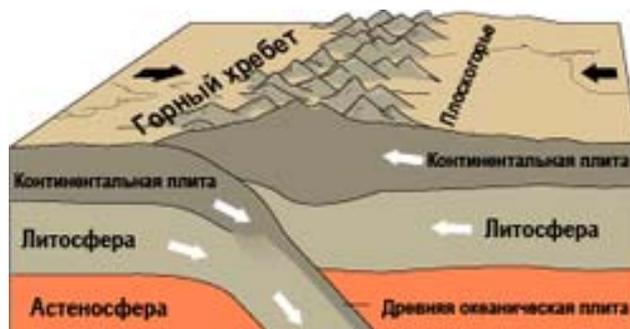


Рис. 16-10. Столкновение континентов.

**Трансформные границы.** Там, где плиты движутся параллельным курсом, но с разной скоростью, возникают трансформные разломы — грандиозные сдвиговые нарушения, широко распространённые в океанах и редкие на континентах.

**Трансформные разломы.** В океанах трансформные разломы идут перпендикулярно срединно-океаническим хребтам (СОХ) и разбивают их на сегменты шириной в среднем 400 км. Между сегментами хребта находится активная часть трансформного разлома. На этом участке постоянно происходят землетрясения и горообразование, вокруг разлома формируются многочисленные оперяющие структуры — надвиги, складки и грабены. В результате, в зоне разлома нередко обнажаются мантийные породы.

По обе стороны от сегментов СОХ находятся неактивные части трансформных разломов. Активных движений в них не происходит, но они чётко выражены в рельефе дна океанов линейными поднятиями с центральной депрессией.

Трансформные разломы формируют закономерную сетку и, очевидно, возникают не случайно, а в силу объективных физических причин. Совокупность данных численного моделирования, теплофизических экспериментов и геофизических наблюдений позволила выяснить, что мантийная конвекция имеет трёхмерную структуру. Кроме основного течения от СОХ, в конвективной ячейке за счёт остывания верхней части потока, возникают продольные течения. Это остывшее вещество устремляется вниз вдоль основного направления течения мантии. В зонах этого второстепенного опускающегося потока и находятся трансформные разломы. Такая модель хорошо согласуется с данными о тепловом потоке: над трансформными разломами наблюдается его понижение.

**Сдвиги на континентах.** Сдвиговые границы плит на континентах встречаются относительно редко. Пожалуй, единственным ныне активным примером границы такого типа является разлом Сан-Андреас, отделяющий Северо-Американскую плиту от Тихоокеанской. 800-мильный разлом Сан-Андреас — один из самых сейсмоактивных районов планеты: в год плиты смещаются относительно друг друга на 0,6 см, землетрясения с магнитудой более 6 единиц происходят в среднем раз в 22 года. Город

Сан-Франциско и большая часть района бухты Сан-Франциско построены в непосредственной близости от этого разлома.

**Внутриплитные процессы.** Первые формулировки тектоники плит утверждали, что вулканизм и сейсмические явления сосредоточены по границам плит, но вскоре стало ясно, что и внутри плит идут специфические тектонические и магматические процессы, которые также были интерпретированы в рамках этой теории. Среди внутриплитных процессов особое место заняли явления долговременного базальтового магматизма в некоторых районах, так называемые горячие точки.

**Горячие точки.** На дне океанов расположены многочисленные вулканические острова. Некоторые из них расположены в цепочках с последовательно изменяющимся возрастом. Классическим примером такой подводной гряды стал Гавайский подводный хребт. Он поднимается над поверхностью океана в виде Гавайских островов, от которых на северо-запад идёт цепочка подводных гор с непрерывно увеличивающимся возрастом, некоторые из которых, напр., атолл Мидуэй, выходят на поверхность. На расстоянии порядка 3000 км от Гавайев цепь немного поворачивает на север, и называется уже Императорским хребтом. Он прерывается в глубоководном желобе перед Алеутской островной дугой.

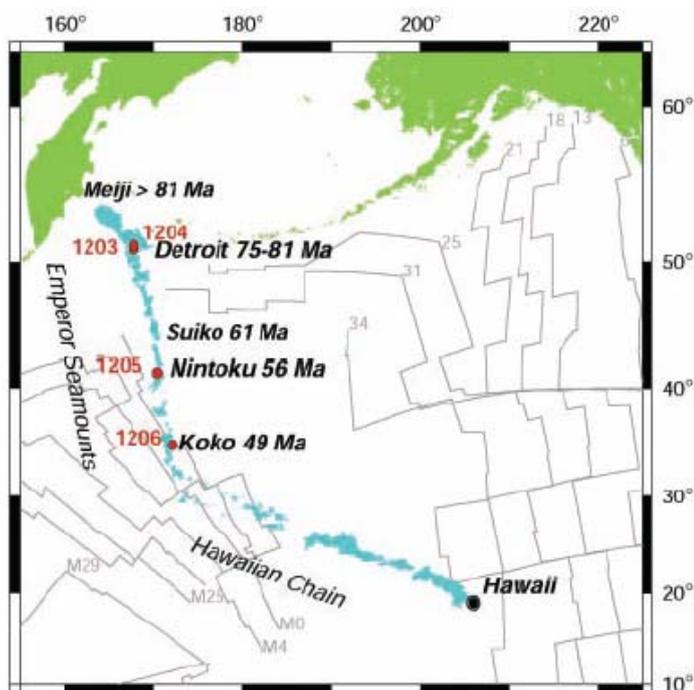


Рис. 16-11. Горячие точки.

Для объяснения этой удивительной структуры было сделано предположение, что под Гавайскими островами находится горячая точка — место, где к поверхности поднимается горячий мантийный поток, который проплавляет двигающуюся над ним океаническую кору. Таких точек сейчас на Земле установлено множество. Мантийный поток, который их вызывает, был назван плюмом. В некоторых случаях предполагается исключительно глубокое происхождение вещества плюмов, вплоть до границы ядра — мантии.

**Траппы и океанические плато.** Кроме долговременных горячих точек, внутри плит иногда происходят грандиозные излияния расплавов, которые на континентах формируют траппы, а в океанах океанические плато. Особенность этого типа магматизма в том, что он

происходит за короткое в геологическом смысле время порядка нескольких миллионов лет, но захватывает огромные площади (десятки тысяч км<sup>2</sup>) и изливается колоссальный объём базальтов, сравнимый с их количеством, кристаллизующимся в срединно-океанических хребтах.

Известны сибирские траппы на Восточно-Сибирской платформе, траппы плоскогорья Декан на Индостанском континенте и многие другие. Причиной образования траппов также считаются горячие мантийные потоки, но в отличие от горячих точек они действуют кратковременно, и разница между ними не совсем ясна.

Горячие точки и траппы дали основания для создания так называемой плюмовой геотектоники, которая утверждает, что значительную роль в геодинамических процессах играет не только регулярная конвекция, но и плюмы. Плюмовая тектоника не противоречит тектонике плит, а дополняет её.

***Тектоника плит как система наук.*** Сейчас тектонику уже нельзя рассматривать как чисто геологическую концепцию. Она играет ключевую роль во всех науках о Земле, в ней выделилось несколько методических подходов с разными базовыми понятиями и принципами.

С точки зрения *кинематического подхода*, движения плит можно описать геометрическими законами перемещения фигур на сфере. Земля рассматривается как мозаика плит разного размера, перемещающихся относительно друг друга и самой планеты. Палеомагнитные данные позволяют восстановить положение магнитного полюса относительно каждой плиты на разные моменты времени. Обобщение данных по разным плитам привело к реконструкции всей последовательности относительных перемещений плит. Объединения этих данных с информацией, полученной из неподвижных горячих точек, сделало возможным определить абсолютные перемещения плит и историю движения магнитных полюсов Земли.

***Теплофизический подход*** рассматривает Землю как тепловую машину, в которой тепловая энергия частично превращается в механическую. В рамках этого подхода движение вещества во внутренних слоях Земли моделируется как поток вязкой жидкости, описываемый уравнениями Навье — Стокса. Мантийная конвекция сопровождается фазовыми переходами и химическими реакциями, которые играют определяющую роль в структуре мантийных течений. Основываясь на данных геофизического зондирования, результатах теплофизических экспериментов и аналитических и численных расчётах, учёные пытаются детализировать структуру мантийной конвекции, найти скорости потоков и другие важные характеристики глубинных процессов. Особенно важны эти данные для понимания строения самых глубоких частей Земли — нижней мантии и ядра, которые недоступны для непосредственного изучения, но, несомненно, оказывают огромное влияние на процессы, идущие на поверхности планеты.

***Геохимический подход.*** Для геохимии тектоника плит важна как механизм непрерывного обмена веществом и энергией между различными оболочками Земли. Для каждой геодинамической обстановки характерны специфические ассоциации горных пород. В свою очередь, по этим характерным особенностям можно определить геодинамическую обстановку, в которой образовалась порода.

***Исторический подход.*** В смысле истории планеты Земля, тектоника плит — это история соединяющихся и раскалывающихся континентов, рождения и угасания вулканических цепей, появления и закрытия океанов и морей. Сейчас для крупных блоков коры история перемещений установлена с большой детальностью и за значительный промежуток времени, но для небольших плит методические трудности много большие. Самые сложные геодинамические процессы происходят в зонах столкновения плит, где

образуются горные цепи, сложенные множеством мелких разнородных блоков — террейнов. При изучении Скалистых гор зародилось особое направление геологических исследований — террейновый анализ, который вообрал в себя комплекс методов, по выделению террейнов и реконструкции их истории.

**Тектоника плит на других планетах.** В настоящее время нет подтверждений современной тектоники плит на других планетах Солнечной системы. Исследования магнитного поля Марса, проведенные в 1999 космической станцией Mars Global Surveyor, указывают на возможность тектоники плит на Марсе в прошлом.

Некоторые процессы ледяной тектоники на Европе аналогичны процессам, происходящим на Земле.

**Когда началась тектоника плит на Земле.** Считается, что первые блоки континентальной коры, кратоны, возникли на Земле в архее, тогда же начались их горизонтальные перемещения, но полный комплекс признаков действия механизма тектоники плит современного типа встречается только в позднем протерозое. До этого мантия, возможно, имела иную структуру массопереноса, в которой большую роль играли не установившиеся конвективные потоки, а турбулентная конвекция и плюмы.

В прошлом поток тепла из недр планеты был больше, поэтому кора была тоньше, давление под более тонкой (в разы) корой было ниже (также в разы). А при существенно более низком давлении и чуть большей температуре вязкость мантийных конвекционных потоков непосредственно под корой была намного ниже нынешней. Поэтому в коре, плывущей на поверхности мантийного потока, менее вязкого, чем сегодня, возникали лишь сравнительно небольшие упругие деформации. И механические напряжения, порождаемые в коре менее вязкими, чем сегодня, конвекционными потоками, были недостаточны для превышения предела прочности пород коры. Поэтому и не было такой тектонической активности, как в настоящее время.

#### 16. 5. Ошибки тектоники плит.

**Перемещения плит и парадокс Мезервея.** Восстановление прошлых перемещений плит - один из основных предметов геологических исследований. С различной степенью детальности положение континентов и блоков, из которых они сформировались, реконструировано вплоть до архея.



Рис.16-12. Пангея (слева). Красная линия – побережье Тихого океана. Предполагаемое первоначальное расположение материков; экваториальная проекция периметра Тихого океана и направления дрейфа материков, необходимые для получения исходной картины (Meservey, 1969) - справа.

Из анализа перемещений континентов было сделано эмпирическое наблюдение, что континенты каждые 400-600 млн. лет собираются в огромный материк, содержащий в

себе почти всю континентальную кору - суперконтинент. Современные континенты образовались 200-150 млн. лет назад, в результате раскола суперконтинента Пангеи. Сейчас континенты находятся на этапе почти максимального разъединения. Атлантический океан расширяется, а Тихий океан закрывается. Индостан движется на север и сминает Евразийскую плиту, но, видимо, ресурс этого движения уже почти исчерпан, и в скором геологическом времени в Индийском океане возникнет новая зона субдукции, в которой океаническая кора Индийского океана будет поглощаться под Индийский континент.

Meservey (1969) показал (см. главу 01), что только на расширяющейся Земле можно получить согласие между современной топологией материков и океанов, и палеомагнитными данными, такими как, дрейф магнитных полюсов и полосовые магнитные аномалии в океанах. "Соединение" материков в Гондвану, в которой Африка, Южная и Северная Америки, Австралия и Антарктида образуют единый праматерик, невозможно на земном шаре, имеющем радиус, равный современному.

Мезервей обратил внимание на то, что материки, расположенные по берегам Тихого океана, не могли 200 млн. лет тому назад находиться друг от друга на расстояниях, больших, чем в настоящее время (рис. 16-12). Для того чтобы образовать Гондвану, этим материкам пришлось бы двигаться вдоль по направлениям, показанным на рисунке 16-12 справа, увеличив примерно вдвое площадь поверхности Тихого океана, что противоречит палеореконструкциям.

***О чем говорят параметры фигуры Земли  $\varepsilon = 1/298$ ,  $C/Ma^2 = 0.333$ ? Парадокс Эверндена.***

Заголовком к этому параграфу взято название статьи Дж. Ф. Эверндена (1997). Автор анализирует известную монографию Г. Джеффриса (1960) в части оценки величин параметров, определяющих фигуру Земли, сравнивает результаты Джеффриса с работой Ламба (1947) и приходит к ряду нетривиальных выводов. Основной из них состоит в том, что Земля сплюснута намного меньше, чем её жидкая модель. Автор объясняет реальное сжатие Земли значительно большей, чем ранее предполагалось, прочностью нижней мантии, а совсем не текучестью её вещества. Более того, он пытается доказать, что прочная мантия Земли сохраняется со времени её образования. Эвернден попутно доказывает, что знание параметров фигуры Земли  $\varepsilon = 1/298$ ,  $C/Ma^2 = 0.333$  ничего не говорит о реальном распределении плотности в Земле.

Джеффрис полагал Землю гидростатичной, однако при этом должно было выполняться правило:  $1/H \approx 1/\varepsilon$  [ $H = (C - A)/C$ ], где  $C$  и  $A = B$  - полярный и экваториальные моменты инерции Земли,  $\varepsilon = 5/4 \times \omega^2 a^3 / GM$  - сжатие Земли,  $\omega$  - скорость её вращения,  $a$  - экваториальный,  $c$  - полярный радиусы Земли, величина, обратная сжатию:  $1/\varepsilon = a/(a - c)$ . Условие гидростатичности современной Земли, вращающейся с периодом  $T = 24$  часа, выполняется при:  $1/\varepsilon = 232$ . Как известно, у Земли:  $1/H = 305.5$ ,  $1/\varepsilon = 297.8$  и  $1/H - 1/\varepsilon = 7.8$ , а наблюдаемая разность 6.75. Все это говорит о негидростатичности Земли. Длительность суток  $T$  для планеты, имеющей размер Земли и её среднюю плотность, должна быть равна:  $T = 27.2$  часа, а не  $T = 24$ , как у Земли. Подчеркнем, что наблюдаемый период вращения  $T$  соответствует  $1/\varepsilon = 232$ , причем отметим, что первым вычислил это ещё Ньютон. Для  $T = 22$  часа, Эвернден подсчитал:  $1/\varepsilon = 200$ . Он пришел к заключению, что если Земля замедляет свое вращение, то её сжатие не будет уменьшаться до тех пор, пока длина суток  $T$  не станет:  $T \geq 27.2$  часа. Или, если Земля вращалась в прошлом быстрее, и её возможная жидкая конфигурация была более сплюснутой, чем сейчас, но её реальное сжатие было бы таким же, как сейчас. Иначе, вывод, к которому приходит Эвернден: Земля никогда не имела сжатия  $1/232$ . Он формулирует следствия из этого вывода. Получается, что у Земли:

- Очень высокая прочность нижней мантии;

- Температура нижней мантии никогда не достигала значений, при которых возникает заметная текучесть под действием ротационных напряжений, т.о. исключается конвекция в нижней мантии;
- Высокая прочность мантии требует, чтобы земное ядро было связано с верхней мантией и корой только с помощью кондуктивного (неконвективного) теплового потока;
- Глубинные мантийные плюмы не могут существовать;
- Отрицая мантийные плюмы, следует отвергнуть гипотезу о том, что граница ядра является источником иридия.

**Астеносфера.** Согласно общепризнанной концепции тектоники плит, материи и плиты перемещаются по слою астеносферы, находящемуся в литосфере на глубине порядка сотни километров и обладающему особыми свойствами, в частности, пониженной величиной вязкости. Эти зоны обнаруживаются методами сейсмического и электромагнитного просвечивания. Однако, как было показано Алексеевым и др. (1977), эти зоны локализованы в тектонически активных регионах (см. рис. 16-13) и их нет в пассивных областях планеты.



Рис. 16-13. Схема астеносферных зон СССР (Алексеев и др., 1977).

Следовательно, нет того слоя, по которому могли бы дрейфовать плиты и материи. Общепринятая точка зрения относительно того, что причиной понижения скоростей сейсмических волн в астеносфере перегрев вещества вплоть до частичного плавления, тоже подвергается сомнению. Например, Карато считает (Karato, 1990), что изменение термодинамических свойств астеносферы обязано не плавлению, как принято считать, а повышению концентрации водорода в зонах присутствия астеносферы.

**Образование океанов.** Возможна ли ситуация, чтобы океаны «перетекали» с места на место, как это следует из плитной тектоники? Для выяснения этого вопроса, обратимся к книге Е.М. Рудича (1984), где показано, что в течение последних 160 млн. лет объем Мирового океана значительно увеличился. Эти данные получены на основе анализа результатов глубоководного бурения (более 500 скважин в течение 70 рейсов исследовательского судна «Гломар Челенджер») акватории Мирового океана, исследования разрезов, вскрытых океаническим бурением и оценки толщины океанических осадков.

В результате изучения акватории Мирового океана выяснилось, что имеются как общие черты для трех океанов (Тихого, Атлантического и Индийского), так и весьма существенные отличия Тихого океана от других. Расчеты, приведенные в книге Рудича, демонстрируют, что в течение «последних» 160 млн. лет объем впадины Мирового океана увеличился весьма значительно: по максимальной оценке на 580 млн. км<sup>3</sup>. (При глубине океана порядка 4 км, это составляет примерно 1/3 всей поверхности земного шара). Резкое увеличение впадины Мирового океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным

снижением его уровня. Рудич приходит к выводу, что увеличение впадины Мирового океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Автор обращает внимание на то, что «... с позиций мобилистских концепций невозможно объяснить крупное приращение объема Мирового океана. Мобилистские гипотезы исключают возможность заметного изменения объема Мирового океана в течение последних 160 млн. лет» (Рудич, 1984, с. 232).

**Глубоководные желоба.** Эти удивительные особенности строения океанического дна принято считать тем местом, где плита ныряет вглубь литосферы. Ранее предполагалось, что океанические осадки должны соскребаться в этом месте и заполнять желоба. Например, только в желобе Кермадек за последние 150 млн. лет должно было поглотиться 13 000 км литосферы (треть окружности Земли!). Можно себе представить, сколько здесь должно скопиться осадков. Как выяснилось, дно желобов, это обнаженные скальные породы без всяких осадков.

**Океан Япетус.** В тектонике плит принято считать, что примерно 600 млн. лет назад на Земле, на месте современной Северной Атлантики, возник океан шириной около 2-х тыс. км, названный Япетусом. Он отделял Северную Америку от Африки-Европы. Океан сначала разрастался, а затем стал поглощаться в зоне субдукции. Это привело снова к сближению Африки и Европы с Северной Америкой. Несостоятельность этой гипотезы доказывает Кэри (1991). Он тщательно анализирует все геологические и палеомагнитные данные и приходит к выводу, что этого мифического океана никогда на Земле не было.

#### **Парадокс в движении палеомагнитных полюсов.**

Данные по местоположению виртуальных магнитных полюсов материков и континентов, приводимые различными авторами для различных геологических эпох, довольно сильно разнятся между собой. Расхождения настолько велики, что восстановление траекторий движения палеополюсов, а по ним - траекторий движения материков в геологическом прошлом, становится лишенным какого-либо смысла. Воспользуемся данными по дрейфу палеополюсов Северной и Южной Америк, Австралии и Африки за последние 240 млн. лет (Tarling, Abdeldayem, 1996). По-видимому, это наиболее достоверные данные. Наш выбор обосновывается тем, что профессор Д. Тарлинг является признанным специалистом по палеомагнетизму и автором известного учебника (Tarling, 1983).

На рис. 16-14 приведены траектории дрейфа палеомагнитных полюсов, определенных по данным, полученным с четырех континентов. Видно, что все зависимости обладают явным соответствием. Например, последние 60 млн. лет полюса дрейфовали по направлению к Северному полюсу практически вдоль меридианов. В более раннее время, характер движения полюсов был другим. Можно видеть, что здесь преобладающими направлениями дрейфа были долготные перемещения МП. На рис. 16-14 можно отметить одновременные (100, 200, 210 млн. лет назад) изменения характера дрейфа для всех четырех траекторий. Наиболее интересен резкий излом в точке, соответствующей 160 млн. лет тому назад. Это явление Тарлинг назвал «экскурсом - 160», который характерен тем, что его «вектор» (см. рис. 16-14) обращен к тому континенту, где он фиксировался. В трех случаях из четырех (кроме Австралии) экскурс-160 имел направление в сторону более высоких широт. Оценить по рисунку длительность «экскурса» не удалось, т.к. она примерно равна времени дискретизации (10 млн. лет).

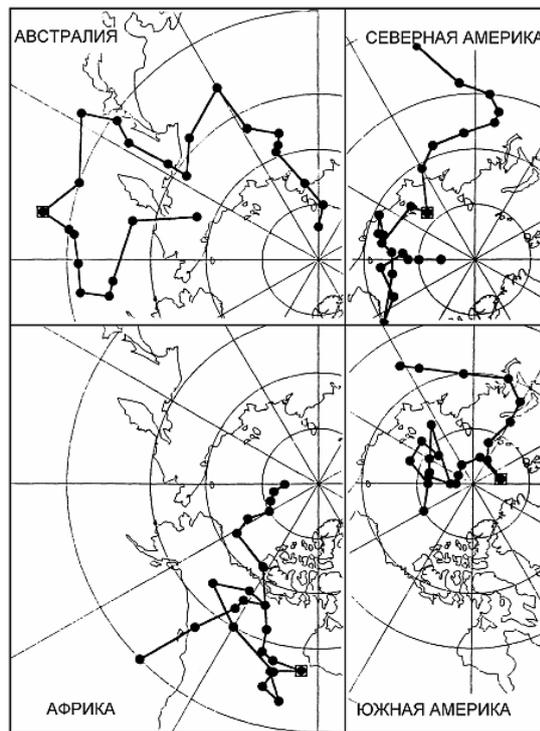


Рис. 16-14. Дрейф ВМП за (10 - 240) млн. лет определенных для Северной Америки, Африки, Австралии и Южной Америки. Прямоугольниками выделены “экскурсы-160” (Tarling, Abdeldayem; 1996).

Рассмотрим внимательнее направление дрейфа ВМП в течение последних 60 млн. лет, когда они дрейфовали в сторону более высоких широт и сравнительно немного отклонялись в долготном направлении. Наибольший интерес для нас представляют траектории дрейфа ВМП, определенные для Австралии и Южной Америки (рис. 16-15). В (Tarling, Abdeldayem, 1996) данные по дрейфу ВМП приводятся, начиная с 10 млн. лет назад. В принципе, мы можем продолжить эти траектории к современному моменту (0 млн. лет). Точка, в которой должны были бы наблюдаться ВМП, в настоящее время имеет координаты:  $86^{\circ}\text{N}$ ,  $185^{\circ}\text{E}$ . На этом же рисунке показано местоположение СМП-94 и видно направление его дрейфа. Продолжая траекторию дрейфа СМП, мы также “встретимся” с этой точкой. Возможно, это не случайное совпадение, и эта точка является магнитным полюсом современной эпохи.

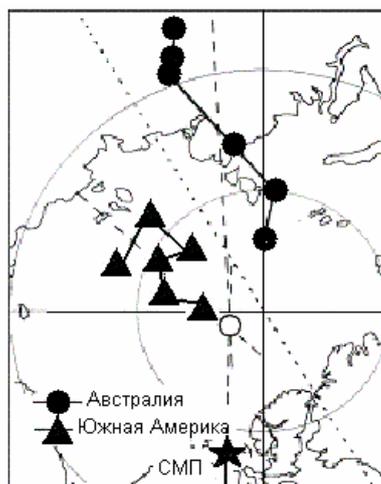


Рис. 16-15. Дрейф ВМП за последние 60 млн. лет. Звездочкой обозначено положение магнитного полюса 1994. Кружком обозначено положение ВМП при приведении траекторий дрейфа к современной эпохе.

Отметим, что направление дрейфа ВМП Южной Америки ориентировано в сторону “своего” материка (где производились наблюдения). Совсем не так ведет себя ВМП Австралии: он дрейфует, удаляясь от “своего” континента (см. рис. 16-15). Обе траектории дрейфа параллельны и скорости дрейфа этих материков примерно равны. Легко показать, что этот парадоксальный факт противоречит современным представлениям.

### *Литература.*

- Алексеев А.С., Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н. и др. Схема астеносферных зон Советского Союза. ДАН СССР. Т. 234. № 4. 1977. С. 790-793.
- Вегенер А. Происхождение материков и океанов /пер. с нем. П. Г. Каминского под ред. П. Н. Кропоткина. — Л.: Наука, 1984. — 285 с.
- Гораи М. Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра. 1984. 110 с.
- Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и развитие. М.: ИЛ. 1960. 485 с.
- Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир. 1991. 447 с.
- Рудич Е.М. Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. М.: Недра. 1984. 250 с.
- Эвернден Дж.Ф. О чем говорят параметры фигуры Земли  $\varepsilon = 1/298$ ,  $C/Ma^2 = 0.333$ ? Изв. РАН Физика Земли. № 2.1997. С. 85-94.
- Anderle R.J., Malynec C.A. Current plane motion based on Doppler satellite observation // Geophys. Res. Lett. 1983. V. 10 N. 1. P. 67-70.
- Carey S.W. The expanding Earth. Amsterdam. Elsevier. 1976. 486 p.
- Karato S-i The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. Nature. 1990. V. 347. P. 272-273.
- Kuznetsov V.V. Characteristic features of continental drift // Modern Geology. 1990. V. 14. P. 239-243.
- Meservey R. Topological inconsistency of continental drift on the present-sized Earth. Science. 1969. V. 166. P. 609-621.
- Tarling D.H. Palaeomagnetism. Chapman & Hall. London. 1983.
- Tarling D.H., Abdeldayem A.L. Palaeomagnetic-pole errors and a “small-circle” assessment of the Gondwanan polar-wander path. Geophys. J. Int. 1996. V. 125. P. 115-122.
- Tarling D.H., Abdeldayem A.L. Palaeomagnetic-pole errors and a “small-circle” assessment of the Gondwanan polar-wander path. Geophys. J. Int. 1996. V. 125. P. 115-122.
- Vogel K. Recent crystal movements in the light of Earth expansion theory. 6<sup>th</sup> International Symposium “Geodesy and Physics of the Earth”. Potsdam. 1989. P. 284-289.