

# СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗОН СТОЛКНОВЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ.

О.П. Иванов, Е.П. Дубинин, А.А. Свешников

Музей Землеведения МГУ

e-mail:Ivanov@mes.msu.ru

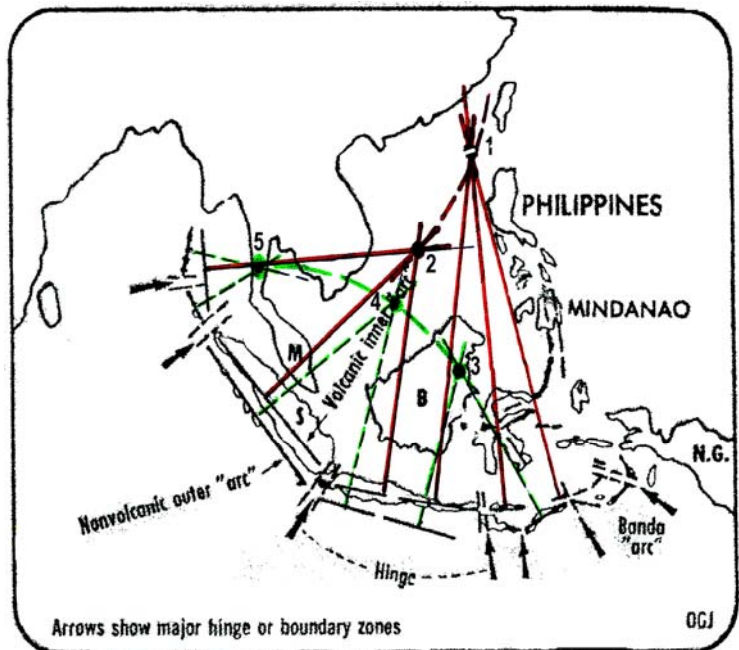
Зоны столкновения литосферных плит Земли являются подсистемами, аккумулирующими упругую и кинематическую энергию взаимодействующих плит и диссипирующими ее избытки в различных видах. Аккумуляция энергии реализуется в двух направлениях: повышение плотности внутренней потенциальной энергии в подсистеме и использование ее для внутреннего усложнения путем структурирования и увеличения числа центров накопления энергии. В процессе накопления энергии отдельные центры или подсистемы более мелкого ранга рано или поздно достигнут состояния неравновесности и вынуждены будут, в целях сохранения целостности системы, начать сброс избытков внутренней энергии, реализуя при этом тот или иной механизм диссипации в зависимости от плотности диссипируемой энергии. Сценарий от накопления до диссипации составляет суть эволюции рассматриваемой зоны. Рассмотрим отдельные акты данного сценария.

Столкновение плит сопровождается поддвигом и соответственно сопротивлением подвигу за счет сил трения взаимодействующих плит. В результате возникают упругие изгибы с обеих сторон взаимодействующих плит. При этом объем, частично заполненный изогнутыми структурами, увеличивается, что приводит к поднятию общего центра тяжести и, следовательно, к росту потенциальной энергии. Этот процесс имеет свое продолжение при переходе к полному заполнению этого объема пластическими складками, что собственно и происходит в условиях столкновений по типу океан-континент (Анды, Кордильеры) и континент-континент (Гималаи и др.).

Дальнейшая аккумуляция потенциальной тектонической энергии возможна в условиях всестороннего сжатия за счет разломообразования и вращательной упаковки блоков. В зоне Индонезийского региона три вектора давления от Индо-Австралийской, Тихоокеанской и Филиппинской литосферных плит всегда создавали постоянное вращательное движение отдельных блоков (рис.1).

Рис.1. Схема смещения центров вращения кайнозойских мегаблоков (1,2) и современных мезоблоков (3,4,5).

На схеме видно, что становление вулканогенных блоков происходило при последовательном смещении двух центров вращения (позиции 1,2). Более современные блоки невулканической дуги сохраняли эту тенденцию, но имели уже свои центры вращения (позиции 3,4,5). Траектория движения этих центров вращения позволяет прогнозировать смещение центра активности.



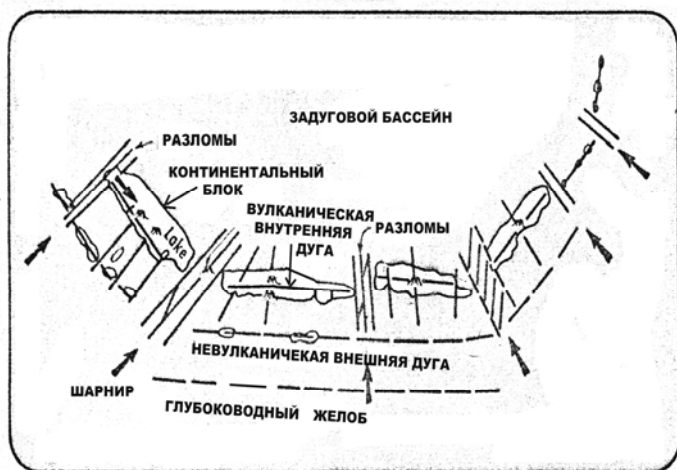
Более тонким механизмом накопления энергии является структурирование подсистемы с образованием центров, обладающих большими аккумулятивными возможностями. Зона тектонической напряженности всегда сильно неоднородна и поэтому содержит множество центров аккумуляции энергии, но не все эти центры могут стать впоследствии диссипаторами.

Это было наглядно подтверждено на полигонах Гарма и Бишкека (Велихов, 2000) . При воздействии мощных импульсных токов от МГД генератора возникает триггерный эффект срабатывания новых очагов землетрясений и при этом существенно меняется характер сейсмического режима региона. Суммарная энергия, выделенная землетрясениями всего района в Гарме в течение 40 суток после всех 34 зондирующих импульсов МГД-установки, оказалась больше энергии, выделенной за тот же срок до них, на  $3,8 \cdot 10^{13}$  Дж, т.е.  $1,1 \cdot 10^{12}$  Дж на пуск. Это на пять порядков больше, чем энергия, отдаваемая МГД-генератором в питающий диполь. Полная сейсмическая энергия, выделенная после пусков, составляет  $2,13 \cdot 10^{15}$  Дж и превышает энергию, выделенную до пусков, на  $1,91 \cdot 10^{15}$  Дж, т.е. составляет  $2,2 \cdot 10^{13}$  Дж на пуск. Из сопоставления данных обоих полигонов получается характерная величина дополнительно выделенной сейсмической энергии: для Гармского полигона -  $6,88 \cdot 10^7$  Дж/пуск-км<sup>2</sup>, а для Бишкекского полигона -  $7,33 \cdot 10^7$  Дж/пуск-км<sup>2</sup>.

Особый вариант накопления энергии – это перевод энергии движения взаимодействующих плит в тепловую за счет трения. Это происходит на плоскости подвига. С одной стороны это диссипативный процесс, но факт формирования магматических очагов на определенной глубине говорит о наличии сильного процесса кумуляции уже преобразованной энергии.

Каждая зона аккумуляции энергии впоследствии может превратиться в диссипативную зону с тем или иным механизмом диссипации. Так в зонах упруго изогнутых валов, в соответствии с законами сопромата, могут возникать разломы с сопутствующими землетрясениями.

Механизм диссипации энергии за счет тектонических деформаций по разному проявлен в зоне столкновения. Например, широко известна пространственно распределенная сейсмичность вдоль плоскости подвига, затрагивающая обе плиты. Это связано с пульсациями самого процесса поддвига по типу «аккумуляция – срыв». С некоторой долей условности можно провести аналогию данного процесса с процессами самоорганизованной критичности. Здесь локальность катастрофических проявлений вдоль всей зоны подвига демонстрирует кумулятивный (концентрированный) характер диссипации.



Вулканическая дуга представляет собой тектоническую зону, состоящую из мегаблоков протяженностью до 1000 и более км, разделенных глубинными разломами (рис.2).

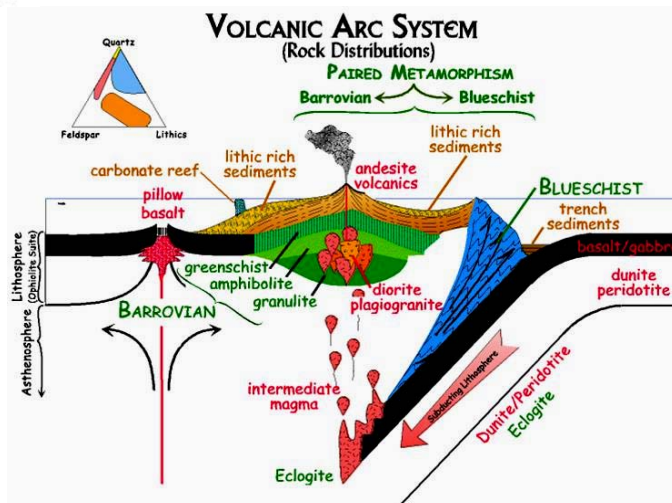
Рис.2. План строения островной дуги.

Мегаблоки, в свою очередь, могут дробиться поперечными разломами на отдельные «клавиши» длиной 100-200 км.

Разломы между мегаблоками активны и имеют глубокое заложение. Именно поэтому здесь локализуются крупные вулканы типа Тамбора и Кракатау.

Термодинамическая сторона диссипации представлена в двух видах. Во-первых, на контакте двух плит за счет трения при поддвиге кинетическая энергия плит преобразуется в тепловую энергию (рис.3).

Рис.3. Структурная схема островной дуги.



Возникают локальные и, следовательно, кумулятивные магматические очаги, имеющие вулканические выходы на поверхность и образующие систему вулканической дуги. Во-вторых, пододвигаемая плита за счет трения вовлекает вышележащие разогретые слои мантии верхней плиты в квазиконвективные движения, что часто приводит к задуговому спредингу.

Диссипация упругой энергии за счет пластических деформаций представлена в основном в зоне преддугового бассейна. Здесь осадки постоянно испытывают давление со стороны пододвигающейся плиты и периодически поступающих новых порций осадков. В зоне аккреционной призмы кумуляция энергии происходит вначале за счет упругого изгиба осадочных пластов, а затем пластических и хрупких деформаций. Складкообразование позволяет, с одной стороны, более плотно упаковать осадочное вещество, а с другой стороны, приводит к увеличению толщины этой упаковки (за счет роста складок и тектонических подвижек вверх), поднимая, таким образом, центр тяжести этой подсистемы и повышая уровень ее потенциальной энергии (рис.4).

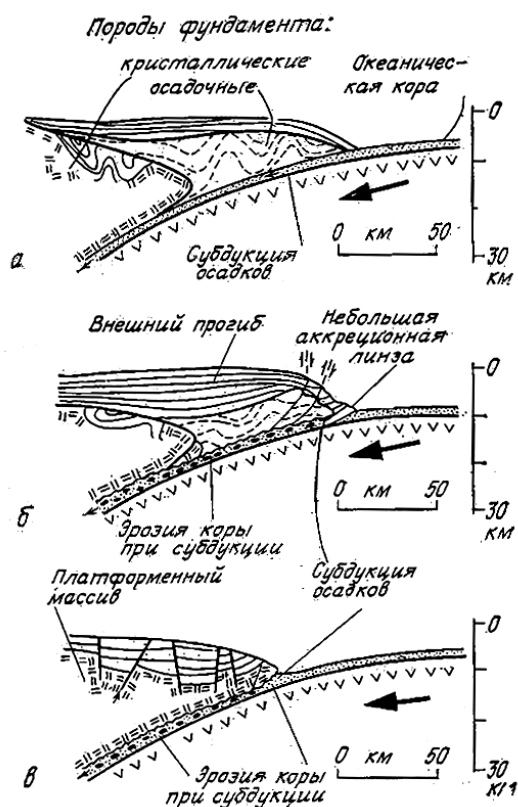


Рис.4. Схематические разрезы, иллюстрирующие процессы субдукции, аккреции и последующей деформации океанических осадков в преддуговом бассейне. а – стадия аккреции и упругого складкообразования в аккреционном клине; б – стадия смятия складок (пластические деформации) и частичное хрупкое разрушение; в – заключительная стадия смятия осадков и общего тектонического разломообразования, на которой во внутренней стенке глубоководного желоба обнажаются магматические и метаморфические породы континентального массива (по Шоллу и др.).

Переход от пластической деформации к хрупкой начинается на микроуровне за счет двух возможных видов движения дислокационных структур - трансляционного и ротационного. *Трансляционный сдвиг* - это перемещение дислокаций параллельно самим себе в каком-либо направлении. *Ротационный поворот* - это поворот дислокаций как единого целого вокруг какой-либо точки (Панин, 1998).

По данным лабораторного моделирования физическая суть процесса пластической деформации сводится к следующему. Пластическая деформация может протекать только в условиях неоднородного напряженного состояния. Зоны максимальных напряжений принято называть концентраторами. Сценарий реализации выглядит следующим образом:

1. Для релаксации этих концентраторов возникает трансляционный сдвиг.
2. Неоднородность поля напряжений приводит к неоднородности трансляционных потоков. Это всегда порождает поле поворотных моментов.
3. Релаксация поля поворотных моментов приводит к ротационному повороту, осуществить который можно при помощи различных механизмов.

4. При ротационном повороте возникают новые источники силовых полей и образуются новые концентраторы напряжения, что вновь приводит к трансляционному сдвигу и процесс повторяется, поддерживая сам себя.

Это обуславливает волновой характер пластического течения твердых тел. В общем случае в деформируемом теле возникает целый спектр волн пластической деформации различной длины, которые определяют иерархию структурных уровней деформации в заданной среде. Если в материале нет внутренней структуры (аморфное состояние), определяющую роль в распространении волны пластического течения играют боковые поверхности. Коррелированная последовательность элементарных актов разрядки концентраторов напряжений, сопровождается рождением дефектов (Панин, 1998). Каждый акт разрядки (элементарный акт пластичности) ускоряет срабатывание соседних концентраторов. В целом процесс пластической деформации представляется в виде распространения фронта волны активизации концентраторов напряжений. Элементарные акты релаксации напряжений рассматриваются как диссипативные пространственно-временные структуры. В процессах пластической деформации ядра складок превращаются в центры кумуляции энергии. Дальнейшее накопление с неизбежностью приводит к возникновению диссипативных зон хрупкой деформации, которые могут перерасти в кумулятивно-диссипативные процессы в виде землетрясений.

Роль кумулятивных диссипаторов энергии играют разломные зоны (Иванов, 2006). Землетрясение – локальное явление и характеризуется сбросом энергии высокой плотности вдоль узкой зоны разломов, возникающей в наиболее напряженном месте, ориентированных под некоторым углом к линии максимальных напряжений. Кумулятивные образования – это наиболее быстрый способ энергопереноса. Отметим, что процесс вспарывания при землетрясении близ Суматры в 2004 г длился 8 мин., а зона разрушений распространилась на 1 300 км. Таким образом, скорость трещинного распространения энергии составила 2,7 км/с, что превышает скорость распространения упругих волн в осадочных породах (гиперскорость). Пропускная способность структурированной кумулятивной зоны, например молнии (Иванов, 2006), в  $10^9$  раз превышает скорость продвижения энергопотоков за счет электропроводности воздуха.

Явления кумуляции моделировались на примере лавинообразного развития молний и трещин в твердых телах. В соответствии с этими моделями скорость роста столба молнии или трещины при фазовом переходе в зависимости от времени определяется соотношением:

$$L(t) = L_0 \exp(t/\tau)$$

где  $\tau$  постоянная времени, определяемая энергией, идущей на формирование единицы длины обобщенной трещины или элемента молнии. Согласно (Высикайло, 2003) разрушение металлических конструкций со временем происходит вначале по экспоненциальному или гиперболическому закону, если не возбуждаются новые степени свободы, противодействующие неограниченной кумуляции энергомассовых потоков и их фазовому переходу в энергию развивающейся регулярной диссипативной системы.

#### *Список литературы*

*Велихов Е.П., Лисина А.С., Матвеев О.Г., Панченко В.П. Применение МГД-установок для глубинных электромагнитных исследований земной коры и поиска полезных ископаемых. М., 2000, Препринт ИАЭ-6177/1-55с.*

*Высикайло Ф.И. Процессы амбиполярного переноса в формировании неоднородных профилей в структурах в газоразрядной плазме. Дисс. На соиск. уч. степени д.ф.-м.н. Троицк М.О.: ТРИНИТИ, 2003, 268 с.*

*Иванов О.П. Природа мегацунами и возможности прогноза. «Синергетика. Труды семинара».*

*Материалы конференции «Самоорганизация и синергетика». М.: МГУ. 2006., с.294-307.*

*Панин В.Е. // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 4-22.*