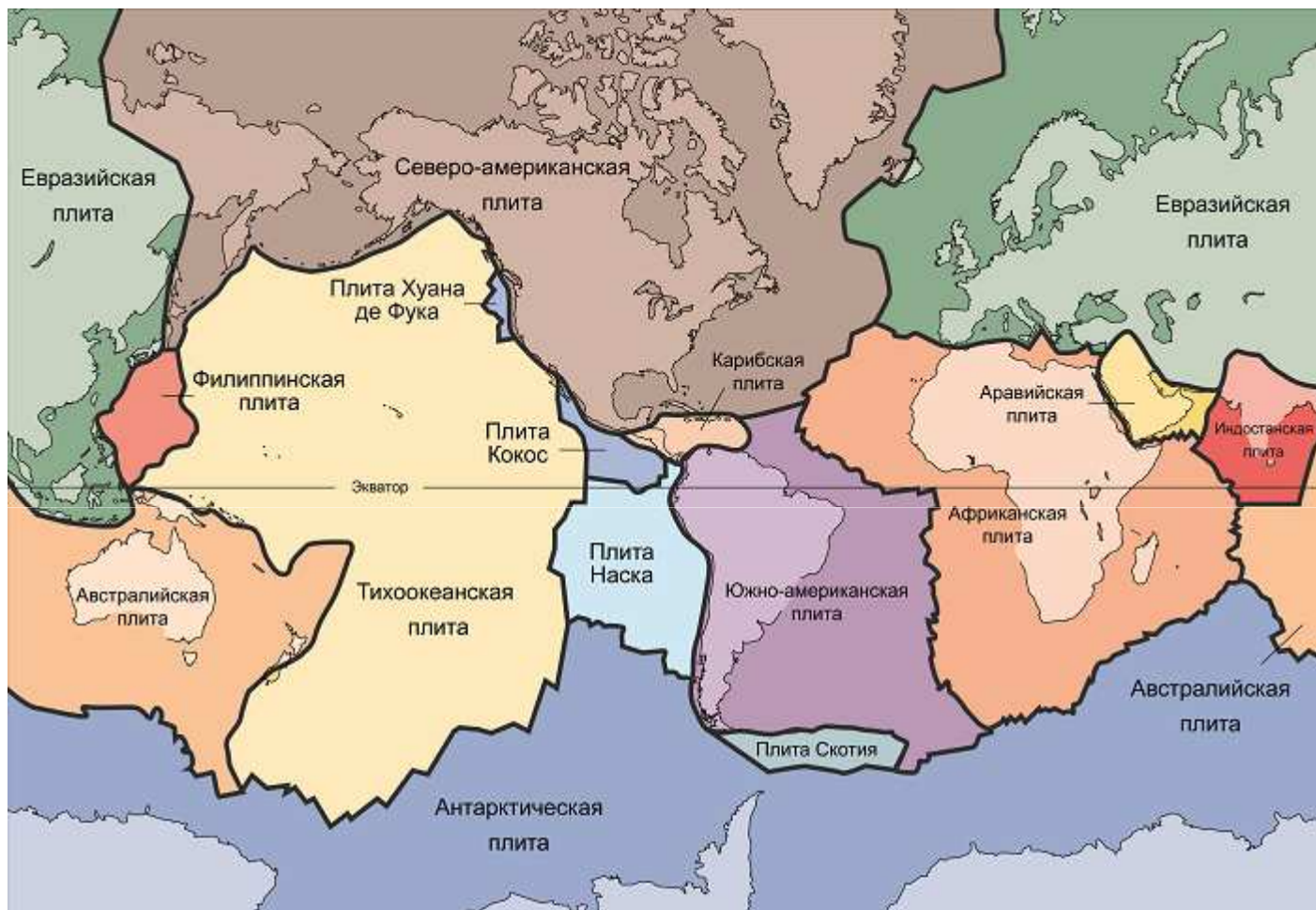


Максимальная возможная энергия землетрясений

**В.Н. Шумилов,
ООО «ЭРА», г. Киев, Украина
e-mail: vnshumilov@rambler.ru**





Целью настоящей работы является методика оценки потенциальной энергии одноосевого субгоризонтального сжатия земной коры и выявление механизма ограничения количества энергии, выделяемой в одиночном землетрясении (той части потенциальной энергии сжатия коры, которая переходит в энергию сейсмической волны.)

За короткое время протекания землетрясения высвобождается огромная потенциальная энергия, которая была заключена в упруго деформированной земной коре. Эта упругая деформация, энергия которой превращается в энергию сейсмической волны, представляет собой упругий изгиб (сдвиг) или одноосевое субгоризонтальное сжатие (а не всестороннее литостатическое) миллионов кубических километров упругих пород земной коры. Именно энергия упругого одноосевого сжатия или изгиба, сдвига, освобождается при неупругой деформации (хрупкой, пластичной) в момент превышения предела прочности пород с некоторым уменьшением сжатия за счёт выравнивания напряжений в различных направлениях при смещении упруго деформированного участка.

Породы земной коры упруги, но не совершенно упруги — они очень медленно текут. Но текут они ещё медленнее, чем текут под корой очень вязкие мантийные породы. Породы коры ещё более вязкие, чем породы мантии, в основном, из-за их меньшей температуры. Текучесть пород коры настолько ниже текучести пород подстилающей мантии, что в большинстве случаев породы коры при их совместном рассмотрении с породами земной мантии можно считать не текучими, аморфными, а твёрдыми, кристаллическими. Поэтому можно сказать, что породы коры твёрдые (но не кристаллические, потому что всё-таки текучие).

Кинетическая энергия движения миллиардов кубических километров литосферных плит и мантийных конвекционных потоков из-за очень малой скорости их движения имеет такой же порядок, что и кинетическая энергия подростка, едущего на велосипеде со скоростью 10 м/сек. С другой стороны, благодаря огромной вязкости недр (твёрдости в обычных для человека масштабах времени) мантийные потоки под земной корой силой вязкого трения увлекают и упруго деформируют менее текучую земную кору (сжимают, изгибают) с огромной силой, выражение для оценки которой получено в [2], что приводит к накоплению огромной потенциальной энергии упругого сжатия или изгиба упругой коры (в пределах её упругости).

Время от времени в ходе очень медленного движения коры и более глубоких земных недр под действием различных сил равнодействующая этих сил превышает предел прочности коры (недр), и тогда происходит неупругая деформация (пластичная, хрупкая). Поскольку силы, превышающие предел прочности, огромны (напряжения порядка 200 МПА по [1]), то в момент превышения предела прочности за короткое время они успевают разогнать огромные массы недр (смещаемые в этот момент) до ощутимых скоростей, что и воспринимается нами как землетрясение. Это резкое смещение недр порождает упругую сейсмическую волну, распространяющуюся в очень вязких (твёрдых!) земных недрах.

Модуль упругости гранита (базальта и других пород коры по [3, 4]) имеет величину порядка

$$E = T/(\Delta L/L) = (3500-5000) \cdot 10^7 \text{ н/м}^2 = 0.5 \cdot 10^5 \text{ МПА}$$

То есть, при напряжении в 1 атм = 0.1 МПА, линейный размер образца изменяется на $\Delta L/L = T/E = (0.1 \text{ МПА}) / (0.5 \cdot 10^5 \text{ МПА}) = 2 \cdot 10^{-6}$.

Или на 0.002 мм для L= 1метр.

Предельному (разрушающему) напряжению пород коры в 200 МПА [1] соответствует относительное изменение длины образца в $(200 \text{ МПА}) / (0.5 \cdot 10^5 \text{ МПА}) = 4 \cdot 10^{-3}$,

или 4 мм для образца длиной в 1 метр.

Оценим количество потенциальной энергии, переходящей в энергию землетрясения при сдвиге края плиты в направлении сжатия на 1 метр в момент превышения предела прочности пород коры. В нулевом приближении при таком сдвиге полосы коры длиной в 5000 км, толщиной 40 км и шириной в 100 км освободится потенциальная энергия

$$A = F \cdot \Delta X = (T \cdot S) \cdot \Delta X = \\ (200 \text{ МПа} \cdot (40 \cdot 100) \cdot (1000 \cdot 1000) \text{ м}^2) \cdot 1 \text{ м} = 8 \cdot 10^{17} \text{ Н} \cdot \text{м} = \\ 8 \cdot 10^{17} \text{ Дж}, \text{ что соответствует приблизительно}$$

$M \approx 8.7$ (в соответствии с определением магнитуды

$$M = \frac{2}{3} \cdot (\lg(E[\text{дж}]) / \lg(10^{17} \text{ дж}) - 4.8).$$

При сдвиге края плиты субгоризонтальное напряжение в ней слегка уменьшится, а именно:

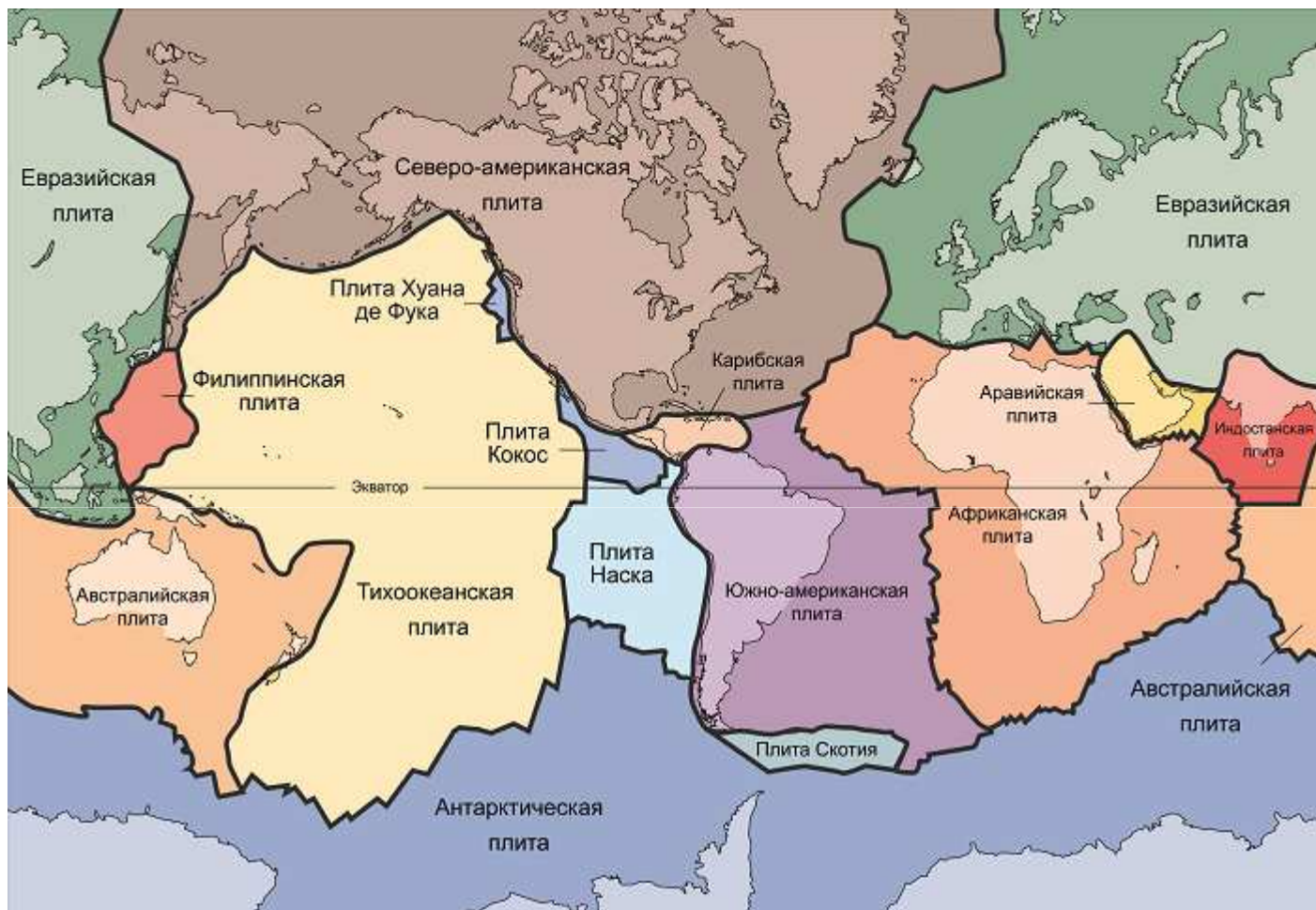
$$\Delta T = 0.2 \cdot 10^{-6} \cdot 50000 \text{ МПА} = 0.01 \text{ МПА}$$

на фоне действующих 200 МПА.

И это при сдвиге края плиты на 1 метр!

Если бы произошла полная разрядка напряжения с уменьшением T от 200 МПА до 0 при названных размерах рассматриваемой плиты, то её край сместился бы на

$$\Delta X = X \cdot T / E = 5000 \text{ км} \cdot (200 / 50000) = 20 \text{ км.}$$





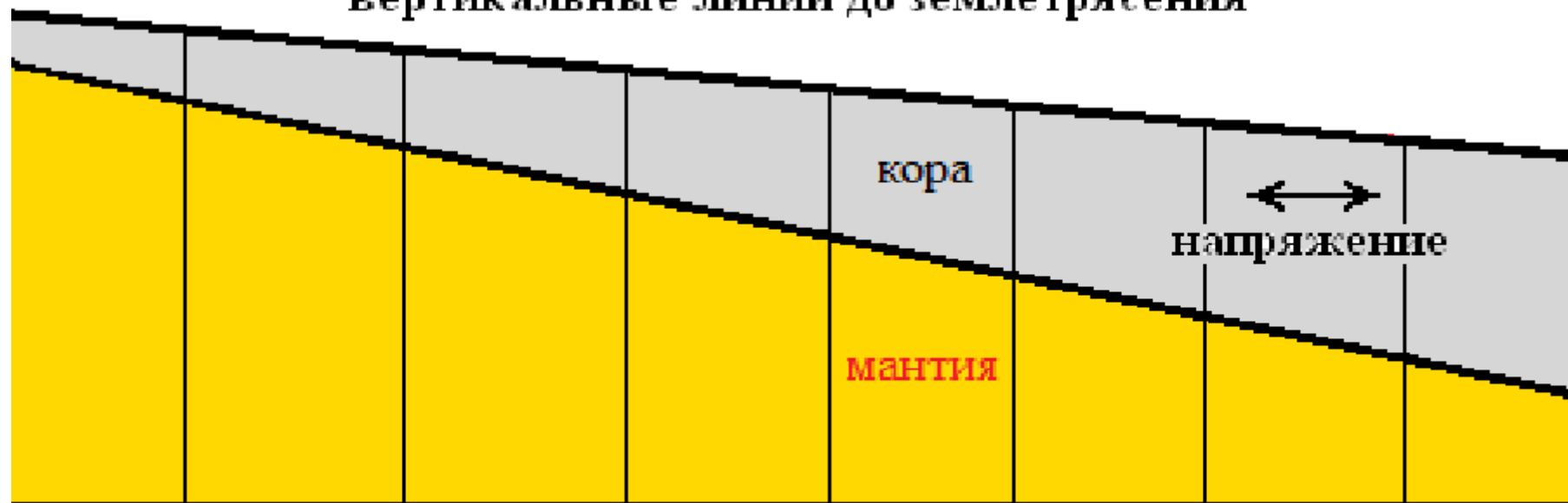
Видим, что даже при сдвиге края плиты на 1 метр с освобождением огромной энергии ($M \approx 8.7$) одноосевое субгоризонтальное напряжение T практически не уменьшится. Почему же сдвиг плиты при землетрясении прекращается (останавливается) при сравнительно малых смещениях края плиты, хотя напряжение одноосевого сжатия в плите практически не уменьшается?

Почему при землетрясениях не происходят многокилометровые смещения, которые соответствовали бы существенному уменьшению одноосевых субгоризонтальных напряжений? Почему, тем самым, ограничивается энергия землетрясений?

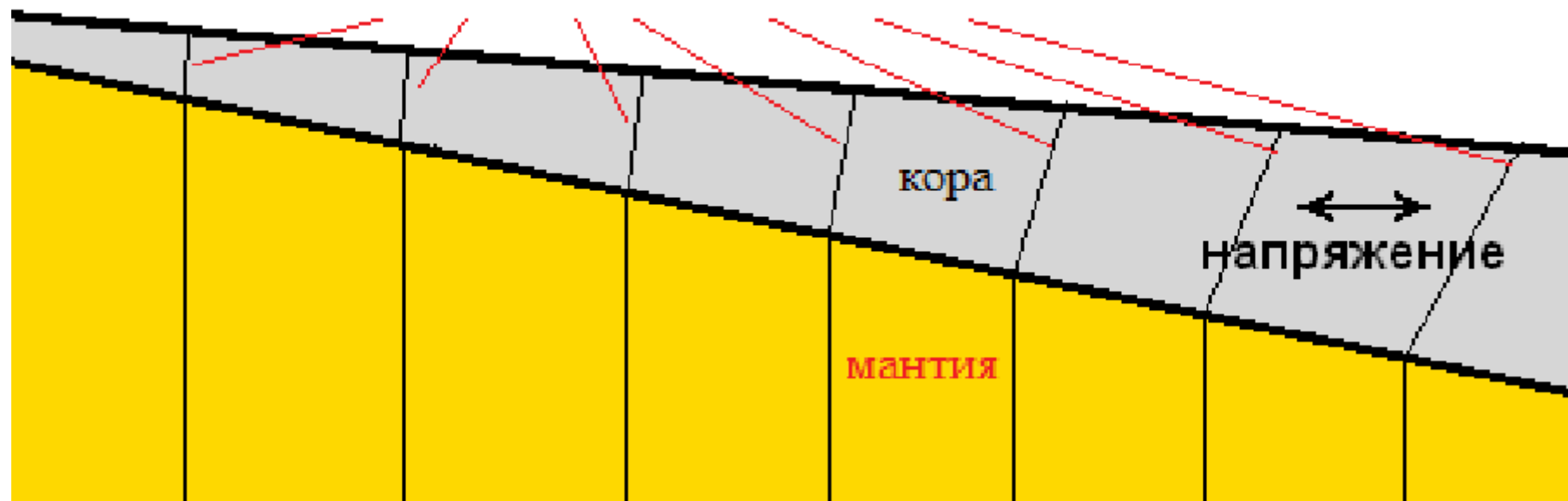
Дело в том, что упруго сжатая плита прочно связана с подстилающей мантией. Как бы приклеена к верхней поверхности мантии, которая до землетрясения была практически не напряжена в силу своей гораздо большей текучести. Поэтому при быстром разжимании упруго сжатой в субгоризонтальном направлении плиты вместе с уменьшением напряжения сжатия в плите и в мантии возрастает упругое напряжение сдвига относительно подстилающей мантии, которое уравнивает разжимающую силу уже при сравнительно малых смещениях земной поверхности. Так что деформации земной коры в момент землетрясения в окрестностях очага подобна деформации толстого слоя желе в наклонённой коробке. При этом верхняя поверхность желе быстро смещается на некоторое расстояние, а нижняя остаётся как бы приклеенной к дну коробки, моделирующему в данном случае подстилающую мантию. Смещение верхней поверхности желе ограничивается напряжением сдвига его слоёв.

Аналогичное явление происходит и при сдвиге тектонической плиты во время землетрясения – сдвиг плиты прекращается не потому, что сдвигающая сила обращается в нуль, а потому, что эта сила уравнивается силой реакции сдвиговых напряжений, возникающих в плите. Упруго сжатая плита разжимается, оставаясь в прочной связи с подстилающей мантией, ненапряжённой до того, как бы прочно приклеена к её поверхности. Поэтому при разжимании упруго сжатой в субгоризонтальном направлении плиты в ней по мере сдвига (вместе с незначительным уменьшением напряжения сжатия) возрастает упругое напряжение сдвига, которое компенсирует разжимающую силу уже при сравнительно малых линейных смещениях земной поверхности в субгоризонтальном направлении.

вертикальные линии до землетрясения



смещение вертикальных линий в результате землетрясения



Оценим силу сдвигового напряжения, возникающую при землетрясении в результате упругого сдвига полосы земной коры шириной 100 км. Для получения оценки примем, что кора всюду одинакова по толщине, и при сдвиге плиты упруго деформируется только сама плита, но не подстилающая мантия.

При этом нижняя поверхность плиты и подстилающая её мантия остаются неизменными, не меняют своей формы и размеров.

$$F = T \cdot S; S = 5 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot 100\,000 \text{ м};$$

$$T = G \cdot \operatorname{tg} \alpha = 20\,000 \text{ МПА} \cdot (\Delta X / H)$$

$$= 20\,000 \text{ МПА} \cdot (\Delta X / 40 \text{ км}) = 0.5 \cdot 10^6 \cdot \Delta X \text{ МПА};$$

$$F_{\text{сд}} = 0.5 \cdot 10^6 \cdot \Delta X \text{ (н/м}^2\text{)} \cdot 5 \cdot 10^{11} \text{ м}^2$$

$$= 2.5 \cdot 10^{17} \text{ н} \cdot \Delta X \text{ ([метр]/метр)};$$

Эта сила сдвигового напряжения, возникающая в результате смещения верхней поверхности коры, уравнивает подсчитанную выше для случая полосы коры шириной 100 км силу сжатия $F_{\text{сж}} = 8 \cdot 10^{17} \text{ н}$. Эта сила сдвигов. напряжения развивается уже при сдвиге края плиты на ΔX чуть больше, чем на 3 метра $(= (8 \cdot 10^{17} \text{ н}) / (2.5 \cdot 10^{17} \text{ н/метр}))$.

Полученные значения смещения поверхности, полученные в нашей оценке, приблизительно соответствуют измеренным значениям смещений краёв плит при землетрясениях катастрофической мощности. Так, для катастрофического японского землетрясения весной 2011 года вчера приводились измеренные горизонтальные смещения океанического дна в 3 метра.

В действительности же сила, возникающая в результате сдвига, зависит от многих факторов, так что точно подсчитать её достаточно трудно, а без точного знания локальных характеристик коры (по всей толщине) и подстилающего слоя мантии просто невозможно.

Наши рассуждения позволяют лучше понять механизм освобождения потенциальной энергии сжатия коры и её переход в энергию сейсмической волны в момент землетрясения.

А также понять механизм ограничения величины смещения коры и сделать однозначный вывод, что энергия тектонических землетрясений ограничена сверху и составляет для рассмотренного случая плиты длиной 5000 км и 2-х участков шириной в 100 км, сдвигающихся при землетрясении навстречу друг другу приблизительно $2 \cdot 3 \cdot (8 \cdot 10^{17} \text{ Дж})$, что соответствует магнитуде $8.7 + 2/3 \lg 6 = 9.4$.

Аналогичные цифры могут быть получены для сдвиговых деформаций.

Источники

1. Короновский Н.В. Напряжённое состояние земной коры. Соросовский образовательный журнал, №1, 1997, стр. 50

2. Шумилов В.Н. "Главные движущие силы землетрясений, дрейфа континентов и горообразования.

<http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1174973>

3. Справочник

http://www.rusactive.ru/useful/helpinfo/fizika/moduli_elasticity_poisson_ratio

4. Справочник <http://synkov.info/material/modul-uprug.html>

5. Шумилов В.Н. <http://shumilov.kiev.ua/>

СПАСИБО
за внимание!