

УДК 550.348.098.64

К.Ф.Тяпкин¹, М.М.Довбнич¹

О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ЦУНАМИ

Физическая природа цунами объясняется с позиций явления геоизостазии. Описываются условия возникновения гигантских волн, обсуждаются подходы относительно их прогноза.

Согласно современным представлениям существует четыре естественных механизма возбуждения волн цунами: сейсмический, вулканический, оползневый и метеорологический. Более 80% волн цунами возникает при землетрясениях, происходящих в пределах акваторий. Гигантские морские волны распространяются от эпицентра землетрясения в направлении побережья. Им, как правило, сопутствуют высокоскоростные перемещения воздушных масс, усиливающие разрушительную силу волн в прибрежных районах.

Несмотря на то, что ведущие специалисты в области изучения данного явления полагают, что при землетрясениях с магнитудой более 8 баллов вероятность возникновения цунами очень высокая, далеко не всем сильным землетрясениям в океане сопутствуют волны цунами. Основной причиной разрушительных цунами считают резкие вертикальные смещения отдельных участков дна бассейна вследствие сейсмотектонических подвижек. В то же время не все сильные землетрясения вызывают смещения блоков морского дна со значительной вертикальной компонентой.

По мнению авторов, чтобы получить ответы на вопросы о физической природе цунами, можно использовать явление геоизостазии.

Геоизостазия и возможность ее использования для объяснения физической природы цунами.

Понятие равновесного состояния всей Земли как планеты (геоизостазия) впервые озвучено на XXVII сессии Международного геологического конгресса [3].

Под геоизостазией понимается такое состояние вращающейся Земли, которое она приняла бы, если бы слагающий ее субстрат в пределах каждой оболочки стал жидким, не смешиваясь. В этом случае нашу планету можно было бы охарактеризовать совокупностью уровневых поверхностей, представляющих собой систему сфероидов со все уменьшающимися коэффициентами сжатия, в формировании которых участвуют массы всей Земли, включая гидросферу и атмосферу. В достижении геоизостазии участвуют и все физические поля Земли. Для практических целей основное значение имеет сфероид, наиболее близко совпадающий с геоидом. Обычно именно его используют для оценки величины отклонения Земли от равновесного состояния.

¹ ©К.Ф.Тяпкин, М.М.Довбнич

¹ Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

Рассмотрим условия, которым отвечает равновесное состояние нашей планеты (геоизостазия).

В качестве первого условия достижения геоизостазии, учитывая малость коэффициентов сжатия оболочек Земли, можно принять равенство веса секторов Земли, вырезанных одинаковыми центральными телесными углами DW (рис. 1, а).

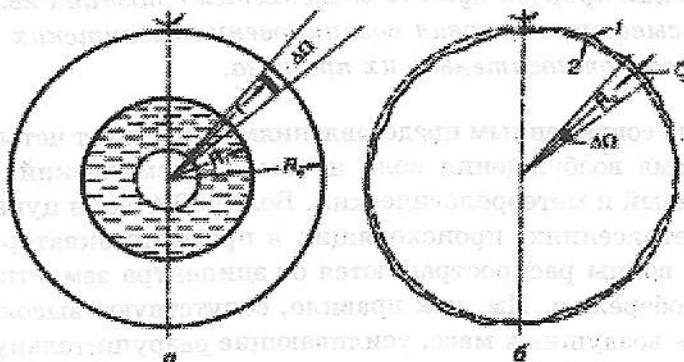


Рис. 1. К определению модели геоизостазии
1 — геоид; 2 — сфероид

Количественно это условие соответствует интегральному выражению [4,7]:

$$\Delta\Omega \int_0^{\infty} \sigma(r)g(r)r^2dr = Const \quad (1)$$

где $\sigma(r)$ — закон изменения плотности в пределах изучаемого сектора Земли; $g(r)$ — ускорение силы тяжести в точках сектора на расстоянии r от центра Земли.

В качестве второго условия достижения геоизостазии примем равенство потенциала в каждой точке Земли ее теоретическому значению, соответствующему приведенному выше определению геоизостазии. Практически выполнение этого условия удобнее проверять на поверхности Земли, а вместо значений потенциала воспользоваться отметками геоида (R_g) и сфероида (R_c). Разность этих отметок (ζ) можно принять как критерий уравновешенности Земли (рис. 1, б). В частности, согласно введенному определению геоизостазии, геоид можно признать находящимся в состоянии равновесия при условии выполнения равенства

$$\zeta = R_g - R_c = 0 \quad (2)$$

В самом деле, если бы сделать геоид жидким, т. е. ослабить взаимосвязь между слагающими его твердыми частицами, то он принял бы фигуру равновесия — сфероид. Однако в реальности наблюдаются отклонения геоида от сфероида, обусловленные неоднородностями строения Земли. Следовательно, должны существовать напряжения, стремящиеся выровнять эти неоднородности, чтобы привести Землю в соответствие с фигурой ее равновесия.

Рассмотрим первое условие достижения геоизостазии более подробно, для чего представим выражение (1) в виде суммы трех интегралов

$$I_1 + I_2 + I_3 = \text{Const}, \quad (3)$$

где

$$I_1 = \Delta\Omega \int_0^{R_i} \sigma(r)g(r)r^2 dr; \quad I_2 = \Delta\Omega \int_{R_i}^{R_e} \sigma(r)g(r)r^2 dr; \quad I_3 = \omega\Delta\Omega \int_{R_e}^{\infty} \sigma(r)g(r)r^2 dr.$$

R_i — внутренний радиус мантии Земли; R_e — внешний радиус Земли, который обычно принимают для геоида R_T (см. рис.1).

Равновесное состояние твердой Земли, ограниченной поверхностью геоида, по-существу, определяется постоянством значений второго интеграла I_2 равенства (3) в изучаемых секторах Земли, так как постоянство значений интеграла I_1 , в связи с квазижидким состоянием внешнего ядра Земли, выполняется автоматически, а максимальное значение интеграла I_3 , численно равное атмосферному давлению у земной поверхности, несоизмеримо мало по сравнению с первыми двумя и на нарушение равновесного состояния Земли практически не влияет. Интеграл I_2 представляет собой основу ранее опубликованной [4, 5] Новой ротационной гипотезы структурообразования в тектоносфере, характеризующей распределение планетарных напряжений в твердой Земле, обусловленных изменением ее ротационного режима. Наибольший интерес для цели настоящих исследований имеет интегральное выражение I_3 . Несмотря на его относительно малое численное значение, стремление к сохранению постоянства в различных секторах Земли определяет сложившуюся динамику перемещений воздушных масс в земной атмосфере.

Следует специально подчеркнуть роль взаимного влияния непостоянства интегральных выражений I_3 и I_2 в соблюдении равновесного состояния отдельных оболочек Земли: если, как указывалось, при использовании значений I_2 для оценки равновесного состояния тектоносферы вариациями значений I_3 можно пренебречь, то нарушения постоянства I_2 могут оказаться соизмеримыми с величиной I_3 в изучаемых секторах Земли, или, по крайней мере, составить существенную их долю. В этом случае на материках нарушается сложившаяся динамика воздушных масс — она в значительной мере будет определяться вариациями величины I_2 в разных секторах Земли, а в пределах океанов в этот процесс будет включен и водный слой. Ниже приведена иллюстрация роли описанных выше взаимоотношений I_2 и I_3 на примере нарушения геоизостазии в результате землетрясения в океане.

Для этой цели воспользуемся интегральным выражением

$$I_3' = \omega\Delta\Omega \int_{R_e-H}^{\infty} \sigma(r)g(r)r^2 dr \rightarrow \text{const} \quad (4)$$

Интегральное выражение I_3' представляет собой сумму интегралов: I_3 из равенства (3) и часть интеграла I_2 в пределах от уровня ненарушенного дна океана ($R_e - H$) до его поверхности (рис. 2).

Пусть результатом землетрясения будет вертикальное смещение его поверхности на величину ΔH (рис. 2). Рассмотрим последствия этого смещения, которые будут иметь место в гидросфере и атмосфере. Одновре-

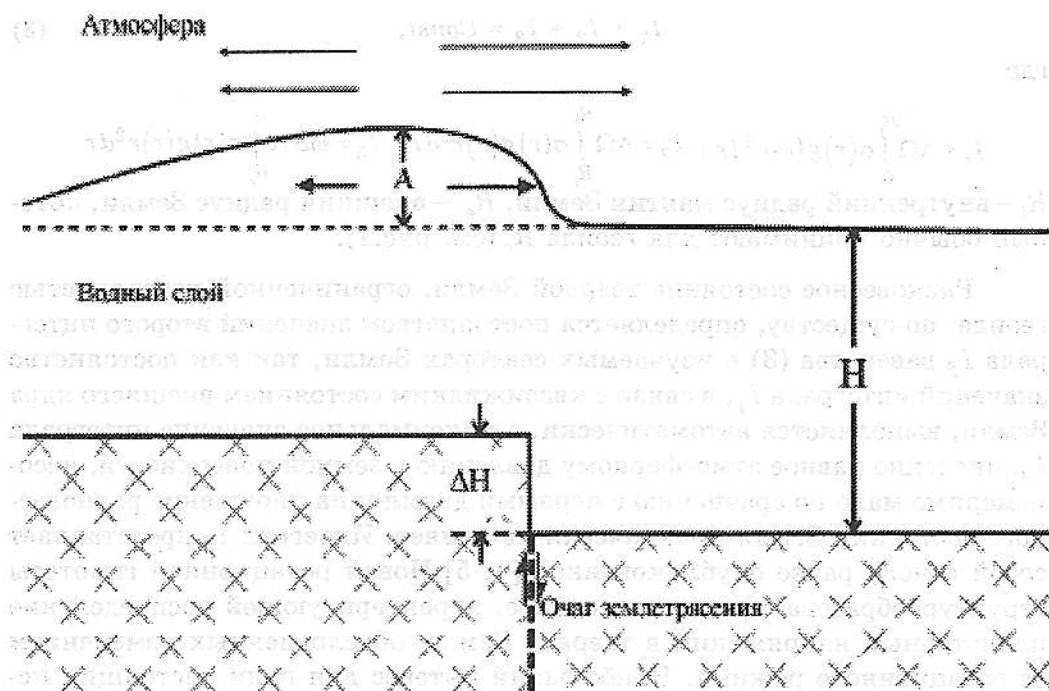


Рис. 2. Схема возникновения волны цунами и сопутствующих им явлений в атмосфере в результате землетрясения в океане

менно со смещением дна, над приподнятым блоком должна возникнуть волна смещений водной поверхности океана, амплитуда которой (A) будет, по крайней мере, соизмеримой с величиной ΔH , но увеличенной за счет кинетической энергии смещения морского дна (сейсмического удара). Восстановление равновесного состояния после землетрясения регулируется соотношением (4), которое представляет собой равенство веса вертикальных столбов с равновеликим основанием и высотой от поверхности ненарушенного дна океана до нижней границы атмосферы. Поскольку в приподнятом блоке (см. рис. 2) в основании такого столба оказался слой пород морского дна мощностью ΔH и плотностью σ_d , то для сохранения веса рассматриваемых столбов по обе стороны от разлома необходимо понижение уровня водного слоя в пределах приподнятого блока на величину $\Delta H(\sigma_d - 1)$, что осуществляется путем волнообразного перемещения водных масс в направлении опущенных блоков.

Атмосфера также участвует в достижении геоизостазии, т.е. в выравнивании изучаемых столбов по обе стороны от очага землетрясения — стремится уменьшить вес приподнятого и увеличить вес опущенного блоков. Это достигается путем направленного перемещения воздушных масс наиболее плотных частей тропосферы.

Следовательно, нарушение геоизостазии в результате землетрясения в океане частично восстанавливается перемещением масс воды, а частично воздушных масс. Естественно, вклад участия атмосферы в восстановлении геоизостазии значительно меньше, по сравнению с водной оболоч-

кой, тем не менее, результатом этого участия является возникновение ураганных ветров.

Исходя из вышесказанного, согласно концепции геоизостазии, возникновению цунами должны удовлетворять следующие условия:

— тектонические подвижки океанского дна должны иметь значительную вертикальную компоненту, так как именно вертикальные смещения блоков приводят к нарушению геоизостазии;

— вертикальные перемещения блоков должны происходить вдоль большого по длине разлома — землетрясение должно иметь протяженный очаг, так как значительное нарушение геоизостазии может произойти только в этом случае; кроме того, для локальных источников амплитуда волн убывает обратно пропорционально пройденному расстоянию, а для протяженных — значительно медленнее;

— должна быть высокая скорость вертикальных подвижек океанского дна, в противном случае произойдет плавная компенсация нарушения геоизостазии; данное условие автоматически выполняется, если речь идет о тектонических подвижках в результате землетрясения.

Как следствие, одним из важнейших вопросов при изучении и прогнозировании цунами является исследование механизмов очагов землетрясений. В настоящее время разработаны подходы их изучения на основе анализа первых вступлений сейсмических волн на записях сейсмических станций. Стереогаммы механизмов очагов землетрясений, соответствующие основным типам смещений по разломам, показаны на рисунке 3. Чаще всего механизм очага представляет собой сочетание основных типов.

В качестве примера рассмотрим несколько сильных землетрясений в океане.

26 декабря 2004г. вблизи западного побережья острова Суматра произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой $M > 9$. Вертикальное перемещение блоков земной коры произошло на протяжении более 1000 км и достигало более 10 м. Стереогамма очага землетрясения данного землетрясения приведена на рисунке 4,а. Как видно, в очаге землетрясения произошло перемещение блоков по субвертикальной плоскости. Землетрясение породило разрушительное цунами, унесшее более 200000 человеческих жизней на побережье стран Юго-Восточной Азии.

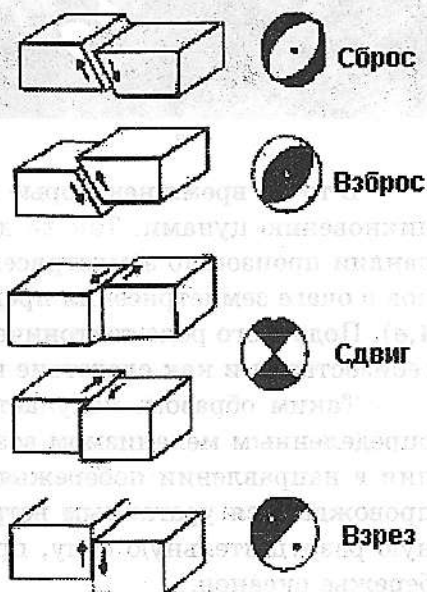


Рис. 3. Типы смещений по разломам и соответствующие им стереогаммы механизмов очагов землетрясений

Три месяца спустя, в этом же регионе 28 марта 2005г. произошло очередное сильное землетрясение с магнитудой $M \approx 8.6$. Землетрясение имело механизм, аналогичный землетрясению 2004 г. (рис. 4,б). Несмотря на меньшие размеры очага, землетрясение спровоцировало цунами, достигавшие высоты 3м у берегов Суматры.

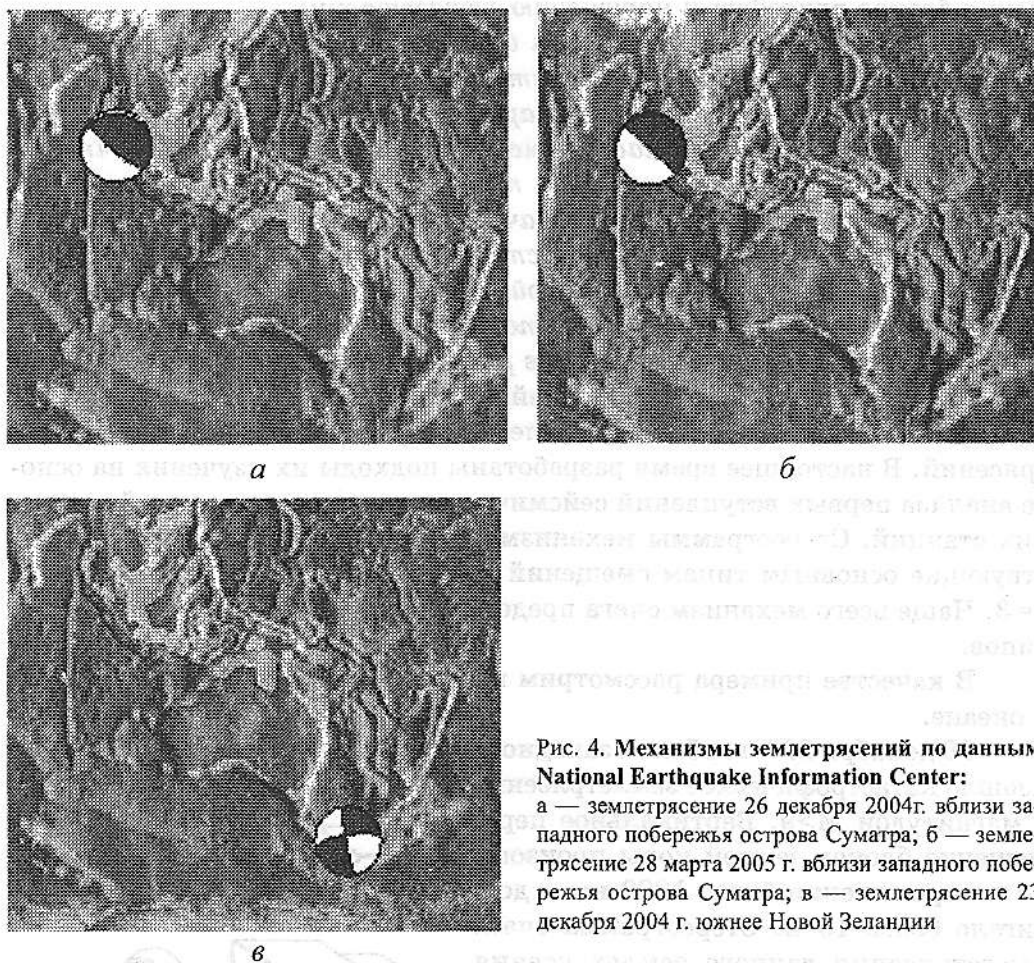


Рис. 4. Механизмы землетрясений по данным National Earthquake Information Center:
 а — землетрясение 26 декабря 2004г. вблизи западного побережья острова Суматра; б — землетрясение 28 марта 2005 г. вблизи западного побережья острова Суматра; в — землетрясение 23 декабря 2004 г. южнее Новой Зеландии

В то же время некоторые сильные землетрясения не приводят к возникновению цунами. Так 23 декабря 2004 г. в океане южнее Новой Зеландии произошло землетрясение с магнитудой $M > 8$. Перемещение блоков в очаге землетрясения представляло практически чистый сдвиг (рис. 4,в). Подобного рода тектонические подвижки не приводят к нарушению геостазии и как следствие не провоцируют возникновение цунами.

Таким образом, получается, что как последствие землетрясений с определенным механизмом возникают движущиеся от очага землетрясения в направлении побережья огромные волны — цунами, которые сопровождаются ураганным ветром. Это природное явление имеет огромную разрушительную силу, приносящую неисчислимые бедствия на побережье океанов.

Обсуждение результатов.

Предотвратить описанное выше природное явление практически невозможно, но своевременное предупреждение о нем поможет населению прибрежных районов океанов свести к минимуму последствия этого катастрофического явления. Реальный запас времени (T), которым оно располагает для этих целей, зависит от удаленности прибрежных районов от очага землетрясения в океане (L) и характеризуется величиной

$$T = \frac{L}{V_d - V_c}, \quad (5)$$

где V_d — скорость распространения упругих волн в твердой Земле, V_c — скорость перемещения волн цунами.

Судя по результатам изучения цунами, запас времени T имеет величину от нескольких десятков минут до нескольких часов.

Возможный путь предупреждения последствий рассматриваемых катастрофических явлений — прогноз места и возможно времени возникновения их источников — землетрясений с соответствующим механизмом в океане (цунамигенное районирование). В ранее опубликованной статье мы подчеркивали, что решение проблемы прогноза землетрясений надо искать путем изучения распределения напряжений в тектоносфере во времени и пространстве [6]. Определенная взаимосвязь между очагами землетрясений, их механизмом и напряжениями, обусловленными нарушением геостазии, отмечена в работе [1].

Комплексный анализ тектоники, напряженного состояния, механизмов очагов землетрясений и влияния космогонических факторов [2] является основой подобного рода исследований, позволяющих сократить как пропуски катастрофических явлений, так и уменьшить вероятность ложных тревог.

1. Довбнич М.М., Тяпкин К.Ф. Отражение геодинамики Черноморской впадины в полях напряжений, обусловленных нарушением геостазии // Геология и полезные ископаемые мирового океана. — 2006. — № 4. — С. 21-30.

2. Довбнич М.М. Влияние вариаций ротационного режима Земли и лунно-солнечных приливов на напряженное состояние тектоносферы // Доповіді НАН України. — 2007. — №11. — С.105 — 112.

3. Тяпкин К.Ф. Новая модель изостазии Земли / Тез. докл. 27 сессии МГК, М.: 1984. — С. 438 — 439

4. Тяпкин К.Ф. Физика Земли. — Киев: Вища школа, 1998. — 312 с.

5. Тяпкин К.Ф., Довбнич М.М. О напряжениях, возникающих в тектоносфере в результате изменения ротационного режима упруго-вязкой Земли // Геофиз. журн. — 2002. — № 2. — С.52-60.

6. Тяпкин К.Ф., Довбнич М.М. Вращение Земли — единственный реальный источник энергии ее тектогенеза // Геофизика. — 2007. — №1. — С. 59-64.

7. Tyapkin K.F. A new isostatic model of the Earth // Geophys. Trans. Budapest: 1984., vol. 30, №1. — P. 3-10.

На засадах явища геостазії пояснюється фізична природа цунамі. Обговорюються умови виникнення гігантських хвиль та підходи щодо їх прогнозу.

The causality of cunami is accounted by geostostatic phenomenon; conditions of gigant waves generation are described. Approaches to prognostication are treated.