

## **Движение масс вблизи земной поверхности в приливной волне**

I. Собственное гравитационное поле Земли стремится придать ей форму шара. Сферическая эквипотенциальная поверхность Земли искажается притяжением Луны и Солнца. Наибольшее искажение вносит воздействие Луны: эквипотенциальная поверхность приобретает форму эллипсоида, большая ось которого направлена на Луну. На уровне поверхности Земли максимальное отклонение от сферы  $\sim 1$  м. На такую же величину уменьшается поперечник эллипсоида по сравнению с исходной сферой.

Если бы Земля не вращалась вокруг своей оси и относительно центра вращения системы Земля - Луна, Земля должна была бы принять форму эквипотенциальной поверхности. Но Земля быстро вращается внутри эквипотенциальной поверхности собственного гравитационного поля, возмущенного притяжением Луны. Это вращение препятствует установлению статического равновесия в земных недрах.

За период почти стационарного функционирования системы Земля – Луна произошел отбор оптимальных вариантов движения масс, согласованных с геологической структурой. Глубинное строение коры фиксирует динамические структуры. Этот акт самоорганизации свершился давно и теперь перемещение масс под воздействием Луны имеет регулярный характер для большинства регионов.

### **II. Приливная волна в океане.**

Движение на поверхности Земли, вызванное притяжением Луны, будем рассматривать в ограниченной области эпицентра воздействия, где возмущение эквипотенциальной поверхности собственного гравитационного поля максимально. Наблюдаемое движение этого возмущения по поверхности Земли связано, главным образом, с вращением Земли вокруг собственной оси. Поэтому оно движется, оставаясь в течение суток примерно на одной широте.

Для описания движения в этой области возмущения, называемой приливной волной, введем систему координат; по одной оси будем откладывать расстояние от эпицентра по траектории на поверхности Земли в градусах; по другой отклонение уровня поверхности от сферы. Притяжение Луны в эпицентре создает бугор (полюс

эллипсоида). Если вести отсчет от невозмущенной эквипотенциальной поверхности, то этот бугор эквивалентен впадине на поверхности Земли, и он должен заполняться водой. Появление впадины означает, что в этом месте снижена нагрузка на твердую Землю и упругая разгрузка начинает поднимать дно океана.

Рассмотрим сначала движение воды в приливной волне, полагая дно недеформируемым. Эквивалентный гравитационному полю прогиб дна представим в виде:

$$\Delta r = -A \cos(2\theta - \beta),$$

Где  $\theta$  - долгота в градусах.

Эта кривая описывает эквипотенциальную поверхность гравитационного поля Земли – отклонение ускорения силы тяжести ( $\Delta g / g$ ) в окрестности полюсов эллипсоида. За сутки ( $360^\circ$ ) максимальные отклонения (впадины) дважды пересекают один и тот же меридиан. В системе координат, где Луна и "привязанная" к ней "впадина" неподвижны, все точки поверхности Земли движутся с огромной скоростью ( $\sim 400$  м/с). С такой же стремительностью океаническая вода втекает во впадину, ускоряясь в поле силы тяжести, а затем этот же поток так же стремительно вытекает из нее, замедляясь на подъеме. Во впадине скорость потока выше, а его толщина меньше, чем вне приливной волны. Видно, что в динамике распределение масс воды в приливной волне очень мало похоже на ту картину, которая возникает в статике или на медленно вращающейся Земле.

Оценим параметры потока в приливной волне, например, для Тихого океана. Глубина его, а значит и толщина потока воды  $\sim 5$  км. Глубина впадины  $A \approx 1$  м. Во впадине поток увеличивает свою скорость на  $\Delta v = \rho g A / v$ .

Приняв  $v=400$  м/с, получим:

$$\Delta v = 10^3 \cdot 10^2 / 4 \cdot 10^4 = 2,5 \text{ см/с}.$$

Толщина потока при этом должна уменьшиться на величину

$$\Delta h = h \Delta v / v = 2,5 \cdot 5 \cdot 10^5 / 4 \cdot 10^4 = 30 \text{ см}$$

В потоке тяжелой жидкости ограниченной толщины изменение скорости течения порождает поверхностные гравитационные волны. Скорость их распространения зависит от длины волны, но не может превышать  $\sqrt{gh}$ . В данном случае  $\sqrt{gh} = 300$  м/с. Эта скорость меньше скорости потока и все поверхностные волны будут сноситься по потоку, а набегающий на преграду поток ничего не будет

"чувствовать" до непосредственного взаимодействия с преградой. В таком "сверхзвуковом" потоке торможение его на выходе из впадины будет плавным.

В том случае, если поток имеет скорость меньше  $\sqrt{gh}$ , поверхностные волны на подъеме быстро нарастят толщину потока и могут привести в конечном счете к заполнению выемки водой.

Рассмотрим теперь изменение уровня дна вследствие упругой разгрузки по оси эллипсоида при одновременном нагружении мантии в поперечнике эллипсоида. Напряжения в земных недрах уравнивают действие силы тяжести на вышележащие слои. Вращаясь вокруг оси, Земля все время меняет свою ориентацию по отношению к эллипсоиду. В соответствии с этим меняется вес различных частей мантии. Однако напряжения в твердом теле не могут измениться мгновенно, так как локальные напряжения зависят от деформации всей оболочки. Перестройка напряженного состояния мантии ограничена скоростью распространения упругих волн сдвига. Если за характерный размер взять диаметр Земли  $\sim 12000$  км и принять среднюю скорость поперечной волны в мантии равной 6 км/с, то задержка деформационной волны от гравитационного возмущения Луной поля Земли будет равна 2000 с. При скорости вращения  $15^\circ$  /час отставание достигнет  $7^\circ$  долготы.

В целом деформационную волну можно представить в виде:

$$\Delta r = B \cos 2\theta .$$

Изменение уровня дна вследствие перестройки напряженного состояния в мантии повторяет форму "впадины", рожденной гравитационным полем системы Земля – Луна, но с другим знаком и с задержкой  $\theta = 7^\circ$ .

Соответственно, сдвиг по фазе будет равен  $\beta = 2\theta = 2 \cdot 7 = 14^\circ$ . Максимальная амплитуда изменения уровня дна (B) может быть оценена следующим образом.

Уменьшение нагрузки по оси эллипсоида и увеличение нагрузки в поперечнике примерно одинаковы:  $\rho L \Delta q$ , где  $L$  – толщина мантии ( $\sim 3000$  км). Сдвиговое напряжение, вызванное этим изменением нагрузок,  $\tau = 2\rho L \Delta q$

Подставляя:  $\bar{\rho} = 5\text{г}/\text{см}^3$ ;  $\Delta q = 10^{-4} \text{см}/\text{с}^2$ , получим:

$$\tau = 2 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^5 \text{дин}/\text{см}^2$$

Принимая модуль сдвига  $\mu = 2 \cdot 10^{12} \text{дин}/\text{см}^2$ , оценим искажение формы шара:

$$\frac{2\Delta r}{r} = \frac{3 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^{12}} = 1,5 \cdot 10^{-7} .$$

Отсюда получаем:

$$B = \Delta r = (1,5/2) \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 10^8 = 45 \text{ см}$$

$$B = 45 \text{ см}$$

Избранный способ оценки показывает, что амплитуда приливной волны зависит не только от изменения силы тяжести ( $\Delta g$ ), но и от механических свойств твердых оболочек Земли.

Движение океанического потока в приливной волне регулируется уровнем дна, если его отсчитывать от невозмущенной эквипотенциальной поверхности гравитационного поля Земли. Профиль дна в окрестности максимальной амплитуды приливной волны является суммой гравитационного возмущения и деформационной волны:

$$\Delta r = -A \cos(2\theta - \beta) + B \cos 2\theta.$$

Чтобы не отвлекаться на сопоставление вариантов с различными параметрами, внесем количественную определенность:  $A = B = 70 \text{ см}$ ;  $\beta = 14^\circ$ .

Преобразуем полученную формулу:

$$\Delta r = 70[-\cos 2\theta (\cos \beta - 1) - \sin 2\theta \cdot \sin \beta]$$

$$\Delta r \cong -70 \sin 14^\circ \sin 2\theta = -17 \sin 2\theta$$

Отсчет долготы  $\theta$  ведется от максимума деформационного поднятия дна в сторону набегающего потока. При  $\theta > 0$  дно имеет впадину, попадая в которую поток ускоряется и становится тоньше, затем, при  $\theta = 0$  поток выходит на нулевую отметку и продолжает тормозиться, взбираясь на бугор: ( $\Delta r > 0$  при  $\theta < 0$ ). В данном примере перепад уровней дна  $\approx 35$  см, изменение скорости потока  $\sim 1$  см/с, а изменение толщины  $\sim 10$  см. Протяженность впадины и бугра  $2\theta \sim 90^\circ$ . Соответственно,  $\theta = 45^\circ$ , для тропиков это  $\sim 5000$  км. Время пребывания каждого элемента потока во впадине (или на бугре)  $\sim 10^4$  сек, т.е. 3 часа. За это время каждое сечение потока сдвинется относительно дна на 100 м.

Таким образом, перемещение водных масс океана в приливной волне достигает заметной величины, причем, периоды поступательного движения весьма длительны. Разумеется, это связано с большой подвижностью жидкости. Так при медленном вращении Земли впадина приливной волны способна часть воды потока, заполняющей впадину, постоянно тащить с собой. Но в рассматриваемом случае при "сверхзвуковом" протекании потока через область возмущения гравитационного

поля во впадине масса воды не накапливается, а накапливается на бугре, там, где замедляется поток. Движение воды в океане, вызванное притяжением Луны и деформацией дна океана, симметрично: все, что происходит в полушарии под Луной, повторяется и в другом полушарии в то же самое время. Приливная волна дважды в сутки пробегает по поверхности Земли.

Однако на самом деле, движение в поверхностных слоях несимметрично. Это связано с тем, что линейная скорость каждой точки твердой поверхности Земли в течение суток меняется, и это создает приливную волну в океане с периодом одни сутки. Земля вращается одновременно и вокруг своей оси и вокруг центра масс Земля-Луна. Этот центр расположен практически на поверхности Земли. Вблизи этого центра, то есть под Луной скорость движения равна окружной скорости вращения Земли. По мере удаления от этого центра скорость поверхности твердой Земли возрастает и при наибольшем удалении оказывается примерно на 20 м/с больше, чем под Луной.

Если за начало координат принять точку, где Луна находится в зените и расстояние измерить в градусах  $\theta$  навстречу вращению, то изменение ускорения можно представить в виде:

$$a = -a_0 \sin \theta$$

Пусть Земля вращается против часовой стрелки. Тогда, двигаясь вместе с твердой поверхностью, на участке  $360^\circ > \theta > 180^\circ$  будем иметь ускорение, а на участке  $180^\circ > \theta > 0$  – замедление движения. Такая кинематика хотя и вызывает дополнительное напряжение в твердом теле Земли, но мало скажется на форме планеты. А вот перемещение воды в океане вследствие изменения скорости движения дна должно быть заметным. Там, где дно ускоряется, там слой воды отстает и утолщается; там же, где дно замедляется, там слой воды нагоняет дно и становится тоньше.

Таким образом, на поверхности жесткой недеформируемой Земли в отсутствии гравитационного возмущения вода в океане перемещается и уровень океана отклоняется от эквипотенциальной поверхности на величину

$$\Delta r(a) = \Delta r_0 \left( \frac{1 - \cos \theta}{2} \right)$$

Хотя сколько-нибудь достоверные оценки величины  $\Delta r$  получить не удалось, кажется весьма правдоподобным считать ее соизмеримой с амплитудой приливной

волны. В этом случае качественные различия фона, на котором формируются приливные волны в полушарии под Луной и на другой стороне Земли, могут найти и количественные выражения.

III. Материковая кора в поверхностном слое имеет ряд отличительных особенностей, которые предрасполагают к горизонтальным подвижкам в приливной волне. Прежде всего, это блочное строение, допускающее смещение их друг относительно друга без возникновения больших усилий на их контактах. В отдельных случаях блоки разделены трещинами и обладают большой свободой перемещения внутри горного массива.

Нарушения сплошности в поверхностном слое не позволяют проявиться силам упругого взаимодействия и поэтому изменения скорости "потока" дезинтегрированного материала поверхностного слоя будет регулироваться, главным образом, гравитационными волнами. Эти волны в слое, толщиной  $h$ , как было отмечено, не могут распространяться быстрее  $\sqrt{qh}$ .

Таким образом, поток блоков горной породы верхнего слоя коры до глубин  $\sim 10-15$  км. будет "сверхзвуковым", и все возмущения скорости движения не смогут повлиять на поток, втекающий во впадину приливной волны.

Подобно тому, как при спуске расцепленных вагонов с "горки", зазоры между блоками во впадине приливной волны будут возрастать, на бугре они будут уменьшаться. Это горизонтальное смещение может существенно превосходить по амплитуде упругие смещения, но разумеется, оно не будет таким же значительным, как смещение воды относительно дна в приливной волне. Препятствовать такому смещению на суше будут силы трения материала поверхностного слоя о поверхность консолидированного основания глубоких слоев материковой коры. Хотя отличие механических характеристик поверхностного слоя и глубоких (более 10-15 км) не является абсолютным, а определяется по реакции на приливную волну, граница между ними должна найти свое проявление и по другим признакам, т.к. "потребность" в этой границе обусловлена постоянно действующим фактором – приливной волной. Положение этой границы (или само ее наличие) в том или другом регионе зависит от геологического строения и механических свойств горных пород.

Рассмотрим в качестве примера движение "свободного" блока в земной коре размером  $10 \times 10 \times 10$  км<sup>3</sup>. Пусть он отделен от своих соседей щелью  $\delta \sim 2$  см. Введя

сильное ограничение на величину смещения относительно соседей, которые связаны с основанием, пренебрежем трением свободного блока по основанию. Изменение гравитационного воздействия на  $\Delta g = 10^4 \text{ см/с}^2$  заставит блок перемещаться в течение времени  $\Delta t = \sqrt{2\delta / \Delta g}$ . В конце пути блок приобретает скорость  $\Delta v = 10^{-4} \cdot 200 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ см/с}$ .

При спуске во впадину блок будет обгонять соседей, а при подъеме на бугор приливной волны – отставать. Таким образом, свободный блок будет расшатывать своих соседей, нарушать связь их с основанием. Следует также иметь в виду, что переход от впадины к бугру приливной волны смещен относительно эпицентра гравитационного возмущения Луной, так что накапливаемое поступательное смещение блока будет происходить против течения потока, вызывая торможение вращения Земли.

Этот пример демонстрирует один из возможных механизмов формирования границы, разделяющей поверхностные и глубокие слои материковой коры.

IV. Заслуживает внимания и движение атмосферы в приливной волне. Движение воздуха в приливной волне малозаметно и представляется, в сравнении с циклоническими потоками, малозначимым. Однако тот факт, что эффективная толщина атмосферы  $\sim 10$  км и, следовательно, предельная скорость гравитационных волн  $\sim 350$  м/с соизмерима с окружной скоростью вращения Земли, кажется не случайным. Рассматривая движение воздушного потока в области гравитационного возмущения поля Луной, отметим, что и здесь скорость движения является сверхзвуковой как по отношению к скорости звука в воздухе, так и по отношению к гравитационным волнам. Обе эти скорости  $c \sim \sqrt{T}$  и  $\sqrt{gh}$  не зависят от плотности и численно близки друг другу.

Движение воздуха в приливной волне не замечает, естественно, изменения уровня дневной поверхности ( $\sim 70$  см) и не может сколько-нибудь заметно повлиять на само гравитационное возмущение поля Земли. Но небольшая масса атмосферы, соизмеримая с массой испаряемой воды за 10 лет с поверхности океана, сама по себе не может служить гарантом ее устойчивости, т.ч. следовало бы выявить стабилизирующие факторы, ограничивающие, в частности, рост толщины атмосферы.

Полагая Землю недеформируемой сферой, посмотрим, как изменится течение потока в области гравитационного возмущения с увеличением толщины атмосферы.

Если это происходит за счет увеличения ее массы при постоянной плотности, скорость звука и гравитационных волн будут возрастать  $\sim \sqrt{h}$ . При толщине  $h = 25$  км предельная скорость гравитационной волны возрастает до 500 м/с и будет превышать окружную скорость вращения Земли. Поток воздуха в приливной волне станет дозвуковым. Втекая в область гравитационного возмущения, он будет ускоряться не только за счет притяжения Луны, но и гравитационной волной разрежения, бегущей навстречу потоку. При выходе из области возмущения поток будет замедляться и гравитационная волна будет способствовать накоплению избыточной массы воздуха в приливной волне. Этот "избыточный" воздух может перемещаться с приливной волной, по-видимому, в виде вихря в вертикальной плоскости, поднимаясь над движущимся потоком. Это один из возможных механизмов, который может ограничивать рост толщины атмосферы. Представляется, что без учета движения воздуха в приливной волне нельзя рассматривать и теплообмен между тропосферой и стратосферой.

Все, связанные с движением воздуха в приливной волне, явления оставались, кажется, до сих пор вне поля зрения естествоиспытателей. Приведенные выше соображения и умозрительные варианты, возможно, привлекут внимание исследователей к движению в приливных волнах.

В заключение отметим, что Солнце также порождает на планете приливные волны, хотя и несколько меньшей амплитуды. Их взаимодействие может сильно осложнить описанную выше простейшую схему движения в приливной волне. Что касается движения воздуха в приливной волне, то обусловленные ею эффекты могут быть усилены за счет энергии солнечного излучения.