

Р. А. Саакян

О ПРИЛИВАХ И ОТЛИВАХ

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей работы показать, что при объяснении приливных явлений на Земле до сих пор учитывались не все силы, действующие на точки поверхности Земли. Показано [2], что вследствие криволинейного движения центра Земли и наличия скорости точек Земли относительно центра Земли в движении точки Земли относительно центра Земли возникает добавочное ускорение, что не учтено в классических теориях приливов. В работе показано, что это добавочное ускорение в экваториальных областях Земли гораздо больше, чем приливные ускорения Луны и Солнца.

В уравнениях динамической теории приливов не учтено добавочное ускорение, возникающее от того, что частица земного океана имеет скорость относительно точки равновесия, а последняя в пространстве имеет криволинейное движение. Вычисления показывают, что им нельзя пренебречь по сравнению с приливными ускорениями от Луны и Солнца. Эти добавочные ускорения имеют периоды изменения, равные периодам звездных суток и звездных полусуток.

Согласно классическим теориям (статической и динамической), лунные приливы должны иметь период 12 ч. 35 минут, а солнечные — 12 час., а максимумы должны совпадать с кульминацией Луны и Солнца. Однако в большинстве мест полная вода не совпадает с кульминацией Луны, а обычно опаздывает на некоторый промежуток времени. При этом изменяются величины максимумов и минимумов.

воды. Опоздание момента полных вод по сравнению с моментом кульминации объясняется трением воды о дно океана. Но вряд ли этим можно полностью объяснить указанное явление, так как это опоздание изменяется.

Как известно, приливы в атмосфере проявляются в периодических колебаниях атмосферного давления, а также в периодических изменениях некоторых свойств высоких слоев атмосферы.

Амплитуды колебания оказываются во много раз большими величинами, чем должны быть по статической теории приливов. Современная теория не дала этому объяснения.

Ряд явлений в земных приливах невозможно объяснить приливообразующими силами F_1 и F_2 Луны и Солнца. Силами F_1 и F_2 Луны и Солнца невозможно объяснить образование больших волн с периодом 23.93 часа, что составляет звездные сутки, а также большие амплитуды изменения давления атмосферы и большие амплитуды изменения уровня моря в разных местах Земли, особенно в тех местах, где наблюдаются сильные морские течения.

Помимо приливообразующих сил Луны и Солнца есть и другие силы, в том числе рассматриваемые в настоящей статье добавочные силы, которые, соединяясь с F_1 и F_2 , вызывают сложные явления приливов и отливов.

Если бы Земля вращалась вокруг своей оси как абсолютно твердое тело, то вследствие вращения Земли вокруг своей оси и криволинейного движения Земли в пространстве не образовались бы приливные волны; но Земля имеет гидросферу и атмосферу, у которых линейные скорости частиц разные. Точно так же твердая часть Земли не является абсолютно твердой, отсюда следует, что под действием добавочных ускорений будут образовываться приливные волны, а также периодические изменения давления воздуха и деформации "твердых" частей Земли.

Морские течения суть поступательные движения значительных масс воды в морях и океанах. Эти течения вызываются главным образом действием силы трения между водой и воздухом, движущимся над поверхностью моря.

Различают периодические, почти периодические и непериодические морские течения. Периодическими являются приливо-отливные течения.

Совершенно постоянных течений вод и ветров не существует. Скорость и устойчивость поверхностных течений меняются в зависимости от изменения вызывающих их сил. Так на некоторых участках наиболее мощных течений (Гольф-стрим, Игольное течение) скорость может достигать 150—190 км в сутки, обычно она держится в пределах 16—32 км в сутки. Скорость второстепенных течений значительно меньше.

По закону Ньютона ускорение от внешнего тела выражается в виде:

$$g^1 = \frac{GM}{r^2}, \quad (1)$$

где G — гравитационная постоянная, M — масса центрального тела, а r — расстояние точки от центра центрального тела.

Предполагается, что приливное явление на Земле происходит от разницы ускорений точек, находящихся в центре и на поверхности Земли. Ускорение от Луны, вызывающее приливное явление, имеет поэтому вид:

$$F = \frac{GM}{r_1^3} \cdot r_1 - \frac{GM}{r_2^3} \cdot r_2, \quad (2)$$

где r_1 и r_2 — расстояния указанных точек от Луны, $\vec{r}$ — вектор. В частности, когда направление $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ совпадают, из (2) приближенно имеем:

$$F = \frac{2GMa}{r^3}, \quad (3)$$

где a — радиус Земли, r — расстояние между центрами Земли и Луны (Солнца).

Составляющие ускорения F по вертикали и горизонтали, происходящие вследствие притяжения Луны (Солнца), выражаются через:

$$F_\delta = \frac{3GMa}{r^3} \left(\cos^2 z - \frac{1}{3} \right). \quad (4)$$

$$F_2 = \frac{3GMa}{r^3} \sin 2z, \quad (5)$$

где z — зенитное расстояние Луны (Солнца).

§ 1. СТАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПРИЛИВОВ

Согласно статической теории приливов, в каждый данный момент океан, покрывающий твердую Землю, находится в равновесии под действием сил тяжести и приливных сил, происходящих от Луны и Солнца. Из этого допущения следует, что свободная поверхность воды примет форму поверхности уровня:

$$V(x, y, z) = \text{const},$$

где V — потенциал всех сил, действующих на жидкость.

Согласно этой теории [1], высота приливов определяется:

$$h = -\frac{1}{g} (V_1 + V_2), \quad (6)$$

где

$$V_1 = -gH_1 \left(\cos^2 z_1 - \frac{1}{3} \right), \quad V_2 = -gH_2 \left(\cos^2 z_2 - \frac{1}{3} \right),$$

$$H_1 = \frac{3m_1 a^4}{2MD_1^3}, \quad H_2 = \frac{3m_2 a^4}{2MD_2^3}, \quad (7)$$

z_1 — зенитное расстояние Луны, z_2 — зенитное расстояние Солнца, m_1 — масса Луны, m_2 — масса Солнца, M — масса Земли, a — средний радиус Земли, D_1 — расстояние между Землей и Луной, D_2 — расстояние между Землей и Солнцем, g — ускорение тяжести Земли.

Из (4), (5), (6) и (7) видно, что формула (6) содержит в себе потенциалы только вертикальных компонентов приливообразующих ускорений F_1 и F_2 .

Иными словами в статической теории роль играют только вертикальные компоненты приливообразующих ускорений.

По формулам сферической тригонометрии имеем: •

$$\begin{aligned}\cos z_1 &= \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos t_1, \\ \cos z_2 &= \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos t_2,\end{aligned}\quad (8)$$

где δ_1 — склонение, t_1 — часовой угол луны,
 δ_2 — склонение, t_2 — часовой угол Солнца,
 φ — широта места наблюдения.

Рассматривая формулы (6), Лаплас [1] указал, что $\cos^2 z_1$ и $\cos^2 z_2$ содержат в себе периодические члены с периодами, равными звездным суткам и звездным полусуткам. Но как показывают формулы (8), в формуле (6) такие члены имеют малую амплитуду.

Между тем, наблюдения показывают, что в морских приливах есть волны с периодами, близкими к периодам звездных суток и звездных полусуток, амплитуда которых достигает амплитуды лунных приливов. Как увидим ниже, эти периодические члены, т. е. приливные волны с периодами, близкими к периодам звездных суток и звездных полусуток, имеют совершенно другое происхождение.

Отметим, что при выводе формул Ньютона и Бернулли предполагается, что угловая скорость вращения точки вокруг оси вращения Земли остается постоянной, а также не учитываются гидродинамические явления, неизбежно возникающие при появлении приливных волн.

Как известно, статическая теория не может объяснить многие явления. Так, по статической теории в сизигии моменты полных вод должны совпадать с моментами совместного прохождения Солнца и Луны через меридиан места, а на самом деле, за редкими исключениями, в сизигии полная вода везде случается позднее на несколько часов (прикладной час).

Суточные неравенства, по теории, должны выражаться во всех местах той же параллели одинаковой величиной, а на самом деле этого нет.

По статической теории самая высокая полная вода должна была бы случаться в дни сизигий, тогда как в большей части мест она опаздывает.

Эти факты говорят о недостаточности статической теории приливов.

§ 2. ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПРИЛИВОВ

Эта теория рассматривает приливы как явление динамическое, т. е. принимает во внимание движение частиц воды, вызываемое приливообразующими силами F_1 и F_2 Луны и Солнца. Динамическая теория считает, что приливы являются результатом волновых движений, которые описываются уравнениями:

$$\begin{aligned}\frac{dV_x}{dt} &= X - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial P}{\partial x}, \\ \frac{dV_y}{dt} &= Y - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial P}{\partial y}, \\ \frac{dV_z}{dt} &= Z - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial P}{\partial z},\end{aligned}\quad (9)$$

где γ — плотность воды, X, Y, Z — компоненты объемной силы, V_x, V_y, V_z — компоненты скорости, P — гидростатическое давление.

Если на воду действуют горизонтальные компоненты приливообразующих сил F_1 и F_2 и сила притяжения, то уравнения (9) приводятся к виду:

$$\begin{aligned}\frac{dV_x}{dt} &= X - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad \frac{dV_x}{dt} = X - g \frac{\partial z'}{\partial x}, \\ \frac{dV_y}{dt} &= Y - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial P}{\partial y}, \quad \frac{dV_y}{dt} = Y - g \frac{\partial z'}{\partial y}, \\ g &= \frac{1}{\gamma} \frac{\partial P}{\partial z}, \quad \frac{\partial z'}{\partial t} = h_1 \left(-\frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_x}{\partial x} \right).\end{aligned}\quad (10)$$

где z' — ордината точки от состояния равновесия, h_1 — глубина воды, X, Y — компоненты суммы приливообразующих сил F_1 и F_2 по горизонтальным осям x и y .

Уравнения (10) решены Эри [1] в частных случаях. Допустив, что по направлению земной параллели существует узкий канал и на точку действуют только приливообразующие силы Луны и сила тяжести, он получил из системы (10) для расстояния точки от точки равновесия:

$$\xi = \frac{agH_1 \sin 2\delta_1 \sin \varphi \cos^2 \varphi}{c^2 - a^2 n^2 \cos^2 \varphi} \sin (nt - \psi) + \\ + \frac{agH_1 \cos^2 \delta_1 \cos^3 \varphi}{4(c^2 - a^2 n^2 \cos^2 \varphi)} \sin 2(nt - \psi), \quad (11)$$

а для значения z'

$$z' = \frac{c^2 H_1^2 \sin 2\delta_1 \sin 2\varphi \cos (nt - \psi)}{2(c^2 - a^2 n^2 \cos^2 \varphi)} + \\ + \frac{c^2 H_1^2 \cos^2 \delta_1 \cos^3 \varphi}{2(c^2 - a^2 n^2 \cos^2 \varphi)} \cos 2(nt - \psi), \quad (12)$$

где t — время, $c = gh_1$, ψ — географическая долгота, n — угловая скорость лунных суток, а остальные величины имеют прежние значения.

Эри рассматривал также схему, согласно которой вдоль земного меридиана существует узкий канал и на точку действуют приливообразующие силы F_1 , F_2 Луны и Солнца и сила тяжести. Он решил уравнения (10) и получил значения расстояния точки от точки равновесия и значения z' .

Итак, согласно каналовой теории, высоты приливных волн являются следствием периодических движений океана под действием приливообразующих сил F_1 и F_2 Луны и Солнца.

Разумеется, что периодические движения вод под действием сил F_1 и F_2 играют роль в образовании приливных волн, однако только этими движениями невозможно объяснить все явления приливов.

По динамической теории получается, что, если глубины морей одинаковы, то суточное неравенство должно пропасть. Однако почти везде есть суточное неравенство.

Из этого следует, что динамическая теория, в которой нет суточного неравенства, так же далека от истины, как и статическая теория.

Общий недостаток статической и динамической теорий приливов заключается в том, что эти теории при объяснении приливного явления не учигывают добавочную силу, возникающую вследствие одновременного вращения Земли вокруг своей оси и криволинейного движения центра Земли

в пространстве, а также—добавочную силу S_1 (см. ниже). Выясняется, что благодаря этим движениям на каждую точку Земли действуют добавочные силы, являющиеся причиной больших членов с периодами, равными периодам звездных суток и звездных полусуток.

§ 3. О ДОБАВОЧНОМ УСКОРЕНИИ, ВОЗНИКАЮЩЕМ
ВСЛЕДСТВИЕ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ ВОКРУГ СВОЕЙ ОСИ
И КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРА ЗЕМЛИ

Д. Г. Дарвин [4] считает, что при обращении Земли около общего центра системы Земля—Луна центробежная сила в каждой точке на поверхности или внутри Земли равна центробежной силе, действующей на центр Земли. Отсюда он заключает, что обращение Земли вокруг общего центра системы Земля—Луна или вокруг Солнца никаких дополнительных приливных ускорений не вызывает.

Однако он не учитывал, что одновременно Земля вращается вокруг своей оси, т. е. точки поверхности имеют скорость относительно центра Земли, а центр Земли имеет криволинейное движение.

Поскольку точки поверхности Земли имеют скорость относительно центра Земли, происходящую от вращения Земли вокруг своей оси, а центр Земли имеет криволинейное движение с угловой скоростью $\bar{\omega}$, то точка поверхности относительно центра Земли получает добавочное ускорение.

Нами показано [2], что когда центр некоторой двойной системы имеет криволинейное движение, тогда относительное ускорение одного из тел равно:

$$f_1 = - \frac{G (m_1 + m_2)}{r^3} \bar{r} + F + S,$$

где m_1 и m_2 — массы компонентов двойной системы, r — расстояние между компонентами, F — приливообразующая сила притяжения, S — добавочная сила:

$$S = 2 [\bar{u} \bar{\omega}] + [\bar{\omega} [\bar{r} \bar{\omega}]] + \left[\bar{r} \frac{d\bar{\omega}}{dt} \right], \quad (13)$$

где $\bar{\omega}$ — угловая скорость криволинейного движения центра двойной системы, $\bar{u}$ — относительная скорость двойной систе-

мы в естественной координатной системе траектории центра тяжести [2], $\bar{r}$ — расстояние между центрами компонентов двойной системы.

Точно так же мы можем утверждать, что вследствие вращения точки Земли вокруг оси вращения и криволинейного движения центра Земли на каждую точку Земли действует добавочная сила, подобная выражаемой формулой (13).

§ 4. ОБ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРА ЗЕМЛИ

Уравнение движения центра Земли относительно неподвижной точки в инерциальной координатной системе согласно закону Ньютона будет:

$$\frac{d^2\bar{r}}{dt^2} = -\frac{Gm\bar{r}_1}{r_1^3} - \frac{GM}{R^3}\bar{R} \quad (14)$$

где r_1 — расстояние центра Земли от центра Луны, R — расстояние между центрами Земли и Солнца, m и M массы Луны и Солнца соответственно.

Считая приближенно $|\bar{r}_1| = \text{const}$, $|\bar{R}| = \text{const}$ из (14), имеем:

$$\frac{d^3\bar{r}}{dt^3} = -\frac{Gm\bar{v}_1}{r_1^3} - \frac{GM\bar{v}_2}{R^3}, \quad (15)$$

где

$$\bar{v}_1 = \frac{d\bar{r}_1}{dt}, \quad \bar{v}_2 = \frac{d\bar{R}}{dt} \quad (16)$$

Угловой скоростью криволинейного движения центра Земли мы будем считать скорость изменения направления главной нормали траектории центра Земли в инерциальной системе, т. е. мы имеем:

$$\bar{\omega} = \frac{d\bar{n}}{dt}, \quad (17)$$

где $\bar{n}$ — единичный вектор по направлению главной нормали кривой движения центра Земли.

Согласно формулам Френе [3]:

$$\frac{d\tau}{ds} = \frac{n}{\rho}, \quad \frac{dn}{ds} = -\frac{\tau}{\rho} - \frac{\beta}{\rho_1}, \quad \frac{d\beta}{ds} = \frac{n}{\rho_1} \quad (18)$$

где τ , n , β — единичные векторы по направлениям касательной, главной нормали и бионормали соответственно, s — дуга кривой, ρ и ρ_1 — радиусы кривизны и кручения кривой.

Из (18) находим:

$$\left(\frac{dn}{ds}\right)^2 = \frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\rho_1^2} \quad (19)$$

но $ds = v dt$, следовательно из (17) и (19) имеем:

$$\omega = v \sqrt{\frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\rho_1^2}} \quad (20)$$

Таким образом модуль ω определяется через (20).

По [3] радиусы кривизны и кручения кривой определяются через:

$$\frac{1}{\rho^2} = \frac{\bar{r}'^2 \bar{r}''^2 - (\bar{r}' \bar{r}'')^2}{\bar{r}'^6} \quad (21)$$

$$\frac{1}{\rho_1} = -\frac{(\bar{r}' \bar{r}'' \bar{r}''')}{\bar{r}'^2 \bar{r}''^2 - (\bar{r}' \bar{r}'')^2} \quad (22)$$

где $\bar{r}' = \bar{v}$ — скорость, $\bar{r}'' = \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2}$, $\bar{r}''' = \frac{d^3 \bar{r}}{dt^3}$ — кривой движения центра Земли, $(\bar{r}' \bar{r}'' \bar{r}''')$ — смешанное произведение, $(\bar{r}' \bar{r}'')$ — скалярное произведение.

Из формул (14), (15), (20), (21) и (22) приближенно имеем:

$$\omega^2 = \frac{\bar{r}''^2 \sin^2(\bar{v} \bar{r}'')}{v^2} + \left\{ \frac{G^2 m M [\bar{R} \bar{v}_1] \cos([\bar{R} \bar{v}_1], \bar{v})}{R^3 r_1^3 \bar{r}''^2 \sin^2(\bar{v}, \bar{r}'')} + \frac{G^2 M^2 \bar{v} [\bar{R} \bar{v}_1]}{R^6 v \bar{r}''^2 \sin^2(\bar{v}, \bar{r}'')} \right\}^2 \quad (23)$$

где $[\bar{R} \bar{v}_1]$ — векторное произведение векторов $\bar{R}$ и $\bar{v}_1$.

Нами будет показано, что сила S играет значительную роль в образовании приливных волн земного океана. Наблюдения показывают, что амплитуда сезонной приливной волны мала. Но поскольку ω входит в S , то сезонная приливная волна в числе других причин должна образоваться и благодаря присутствию в ω члена $\sin^2(\bar{v}, \bar{r}'')$. Отсюда можно заключить, что амплитуда изменения $\sin^2(\bar{v}, \bar{r}'')$ мала.

Считая v большой величиной, из (23) находим

$$\omega = \frac{\bar{v} G^2 m M [\bar{R} \bar{v}_1]}{v R^3 \bar{r}_1^3 \bar{r}''^2 \sin^2(\bar{v}, \bar{r}'')} + \frac{G^2 M^2 \bar{v} [\bar{R} \bar{v}_2]}{v R^6 \bar{r}''^2 \sin^2(\bar{v}, \bar{r}'')} \quad (24)$$

Из (24) видно, что ω в соединении имеет максимальное значение, а в квадратуре — минимальное, ибо в соединении угол между $\bar{R}$ и $\bar{v}_1$ равен почти 90° , а при квадратуре он равен почти 6° . Отсюда следует, что при квадратуре Луна на угловую скорость криволинейного движения Земли мало влияет, а при соединении ее влияние значительное.

Обозначив угол между $[\bar{R} \bar{v}_2]$ и $\bar{v}$ через x , а угол между $\bar{v}$ и $\bar{r}''$ через y и пренебрегая в формуле (24) первым членом по сравнению со вторым, находим:

$$\omega = \frac{G^2 M^2}{R^3 \bar{r}''^2} \frac{\cos x}{\sin^2 y} v_2 \quad (25)$$

Положив приближенно

$$\bar{r}'' = -\frac{GM}{R^2}, \quad (26)$$

находим:

$$\omega = \frac{v_2}{R} \frac{\cos x}{\sin^2 y} \quad (27)$$

Но $\frac{v_2}{R}$ приближенно равняется угловой скорости движения Земли вокруг Солнца. Обозначив ее через ω_c , находим:

$$\omega = \omega_c \frac{\cos x}{\sin^2 y} \quad (28)$$

Таким образом получается, что при большом v величина ω зависит от ω_c и от направления $\bar{v}$.

§ 5. О ПРИЛИВНЫХ ВОЛНАХ ОКЕАНА

Как мы отметили выше, ни статическая теория, ни Каналовая теория приливов не могут исчерпывающим образом решить задачу образования приливов на Земле. Однако для того, чтобы выяснить роль добавочного ускорения, мы введем его как в статическую, так и в динамическую теорию приливов.

Для избежания ошибок статическую теорию приливов мы применим в естественной координатной системе траектории центра Земли. Эта координатная система в данной задаче называется основной координатной системой [2]. Обозначим угловую скорость основной координатной системы через $\bar{\omega}$, а угловую скорость вращения Земли через $\bar{\omega}_1$ (относительно неподвижной координатной системы), тогда угловая скорость вращения Земли относительно основной координатной системы будет: $\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}$.

Если считать, что в каждый момент точка в основной координатной системе вращается с постоянной угловой скоростью $\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}$, то действующая сила на эту точку выразится:

$$-\frac{Gm_0}{r^3} \bar{r} + F_1 + F_2 + S + (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega})^2 a_1. \quad (29)$$

где $a_1 = r \cos(\bar{r}, \bar{a}_1)$, m_0 — масса Земли, r — расстояние от точки поверхности до центра Земли, a — расстояние от точки поверхности до оси вращения ($\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}$).

Между тем в существующей теории считается, что на точку Земли действует сила:

$$-\frac{Gm_0}{r^3} \bar{r} + F_1 + F_2 + \bar{\omega}_1^2 a \quad (30)$$

Примем, что поверхность воды имеет форму поверхности уровня:

$$V(x, y, z) = \text{const}, \quad (31)$$

где V потенциал силы (29).

Выше мы отметили, что в статической теории пренебрегается влияние на точку поверхности горизонтальных компонентов возмущающих сил и учигывается только влияние на эту точку вертикальных компонентов этих сил. Таким образом мы считаем V потенциалом вертикального компонента силы (29), где направление вертикали есть направление силы: $-\frac{Gm_0}{a_0^3} \bar{a}_0 + (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega})^2 \bar{a}_{1(0)}$, $\bar{a}_0$ — расстояние точки равновесия от центра Земли, $\bar{a}_{1(0)}$ — расстояние точки равновесия от оси $(\bar{\omega}_1 - \bar{\omega})$.

Мы можем написать:

$$V = V_0 + V_2 = \text{const}, \quad (32)$$

где V_2 — есть потенциал силы¹: $F_1 + F_2 + S$,

$$V_0 \text{ — потенциал силы: } -\frac{Gm_0}{r^3} r + (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega})^2 \bar{a}_1 \quad (33)$$

Из (32) находим:

$$V_0 - V_0^{(n)} = -V_2 + \text{const}, \quad (34)$$

откуда

$$h = -\frac{V_2}{g} + \text{const}, \quad (35)$$

$$\text{где } g = -\frac{Gm_0}{a_0^3} \bar{a}_0 + (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega})^2 \bar{a}_{1(0)},$$

h — высота приливной волны.

Из (35) следует, что h , вообще говоря, имеет те периоды изменения, что имеют силы F_{1b} , F_{2b} , S_b .

При вышеотмеченном условии скорость точки поверхности относительно центра Земли в основной координатной системе выразится:

$$\bar{u} = [\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}, \bar{a}_1] = (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}) \bar{a}_1 = (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}) r \cos \gamma, \quad (35a)$$

где γ — угол между r и $\bar{a}_1$.

Мы можем считать, что за сутки $\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}$ не изменяется и сила ускорения Земли для точки равновесия есть:

¹ Об этом потенциале смотри ниже.

$$g = -\frac{G m_0 \bar{a}_0}{\bar{a}_0^3} + (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega})^2 \bar{a}_0.$$

Если на точку поверхности действовали бы только силы $F_{1b}, F_{2b}, S_b, -\frac{G m_0 \bar{r}}{r^3} + (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega})^2 \bar{a}$, то высота приливных

волн приближенно определялась бы по формуле (35), однако на точку поверхности действуют и горизонтальные силы, которые играют роль в образовании приливных волн. Мы теперь займемся учетом влияния в явлениях приливов горизонтальных сил.

Для выявления приливных волн, возникающих вследствие влияния горизонтальных компонентов приливообразующих сил, напишем уравнение движения частицы относительно точки равновесия, находящейся на Земле в системе, вращающейся с угловой скоростью траектории точки равновесия, т. е. относительно основной координатной системы [2].

Уравнение точки поверхности (А) относительно неподвижной точки будет:

$$\frac{d^2 \bar{r}_3}{dt^2} = -\frac{GM}{R^3} \bar{R} - \frac{Gm}{r_1^3} \bar{r}_1 - g - f_1 - \frac{1}{\gamma} \text{grad } P, \quad (36)$$

а уравнение точки В (точки равновесия) относительно неподвижной точки будет:

$$\frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = -\frac{GM}{R_1^3} \bar{R}_1 - \frac{Gm}{r_2^3} \bar{r}_2 - \bar{\omega}_1^2 \bar{a}_1 - f_2, \quad (37)$$

где R и R_1 — расстояния от точки А и от центра Земли (от точки 0) до центра Солнца, r_1 и r_2 — расстояния от точек А и 0 до центра Луны, f_1 и f_2 — ускорения, вызванные остальными телами, M и m — массы Солнца и Луны соответственно.

Обозначим угловую скорость движения точки В через $\bar{\omega}'$. Тогда уравнение движения точки А относительно точки В в основной координатной системе будет:

$$\frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = -g + \bar{\omega}_1^2 \bar{a} + F_1 + F_2 - \frac{1}{\gamma} \text{grad } P + S_1 + F_3, \quad (38)$$

где

$$S_1 = 2 [\bar{u}' \bar{\omega}'] + [\bar{\omega}' [\bar{r} \bar{\omega}']] + \left[\bar{r} \frac{d\bar{\omega}'}{dt} \right], \quad (39)$$

$$F = f_2 - f_1$$

$\bar{u}'$ — относительная скорость в основной координатной системе, представляющая собой скорость морского течения на Земле.

Угловая скорость естественной координатной системы траектории точки равновесия относительно неподвижной системы есть $\bar{\omega}'$. Следовательно, в основной системе угловая скорость вращения Земли будет:

$$\bar{\omega}_2 = \bar{\omega}_1 - \bar{\omega}'. \quad (40)$$

$\bar{\omega}'$ определяется через:

$$\bar{\omega}' = v \sqrt{\frac{1}{\rho_2^2} + \frac{1}{\rho_1^2}}, \quad (41)$$

где

$$\frac{1}{\rho_1^2} = \frac{g_1^2 \sin^2(g_1 \bar{v})}{v^4}, \quad \frac{1}{\rho_2^2} = - \frac{\rho_1^2 \left(v g_1 \frac{dg_1}{dt} \right)}{v^6} \quad (42)$$

$\bar{v}$ — скорость точки равновесия,

$$g_1 = - \frac{GM}{R^3} \bar{R} - \frac{Gm}{r_2^3} \bar{r}_2 - \omega_1^2 \bar{a} \quad (43)$$

$$\frac{dg_1}{dt} = - \frac{GM}{R^3} \bar{v}_2 - \frac{Gm}{r_2^3} \bar{v}_1 - \omega_1^2 \bar{v} \quad (44)$$

$$\bar{v}_2 = \frac{d\bar{R}}{dt}, \quad \bar{v}_1 = \frac{dr_2}{dt}, \quad \bar{u} = \frac{d\bar{a}}{dt}$$

При дифференцировании мы считали $|R| = \text{const}$, $|r_2| = \text{const}$.

Из (43) имеем приближенно для экваториальной части Земли

$$g_1 = - \omega_1^2 \bar{a} \quad (43a)$$

Если вместо $\frac{1}{\rho_2^2} + \frac{1}{\rho_1^2}$ брать $\frac{1}{\rho_1^2}$, из (41) находим

$$\omega' = \frac{g_1 \sin(g_1 \bar{v})}{v},$$

откуда, учитывая (43а), получим:

$$\omega' = \frac{\omega_1^2 a \sin(g_1 \bar{v})}{v}, \quad (41a)$$

где $\sin(g_1 \bar{v})$ имеет период изменения звездных суток, ибо направление $\bar{v}$ не изменяется, а направление $\bar{a}$ изменяется, имея период изменения звездных суток.

$$\text{Считая } v = 250 \frac{\text{км}}{\text{сек}}, \quad a = 6400 \text{ км}, \quad \omega_1 = \left(\frac{2\pi}{\text{сутки}} \right),$$

$\max \sin(g_1 \bar{v}) = 1$ из (41а), находим

$$\omega'_{\max} = \frac{\omega_1^2 a}{v} = 4.4 \frac{1}{\text{лет}}.$$

Тогда для S_1 в тах имеем:

$$S_1 = 2 [\bar{u}' \bar{\omega}'] = 2 u' \omega' = 8.8 u',$$

откуда, при $u' = 8 \frac{\text{км}}{\text{час}}$, получим:

$$S_1 = 0.0042 \frac{a \cdot e}{\text{лет}^3}.$$

Эта грубая оценка говорит о том, что S_1 есть величина порядка величин F_1 и F_2 . Следовательно, она должна играть роль в образовании приливных волн.

Из (43) имеем приближенно:

$$g_1 = -\omega_1^2 \bar{a} - \frac{GM}{R^3} \bar{R} \quad (43b)$$

При большом v имеем:

$$\omega' = \frac{v}{\rho_2} \quad (41b)$$

Из (42) находим:

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{v^4}{g_1^2 \sin^2(g_1 \bar{v})} \cdot \frac{\left(\bar{v} g_1 \frac{dg_1}{dt} \right)}{v^6},$$

$$\frac{1}{\varphi_2} = \frac{\bar{v} \left| g_1 \frac{dg_1}{dt} \right|}{g_1^2 \bar{v}^2 \sin^2 (g_1 \bar{v})} = \frac{\frac{dg_1}{dt} \cos x \sin \gamma}{g_1 \bar{v} \sin^2 y}, \quad (42a)$$

где γ — угол между g_1 и $\frac{dg_1}{dt}$,

x — угол между $\bar{v}$ и $\left| g_1 \frac{dg_1}{dt} \right|$, y — угол между g_1 и $\bar{v}$.

Подставив в (42a)

$$\frac{dg_1}{dt} = -\frac{GM}{R^3} \bar{v}_2 - \omega_1^2 \bar{u},$$

находим:

$$\frac{1}{\varphi_2} = \frac{\left| \frac{GM}{R^3} \bar{v}_2 + \omega_1^2 \bar{u} \right|}{V \left| \omega_1^2 \bar{a} + \frac{GM}{R^3} \bar{R} \right|} \frac{\cos x \sin \gamma}{\sin^2 y}.$$

откуда

$$\omega' = \frac{\left| \frac{GM}{R^3} \bar{v}_2 + \omega_1^2 \bar{u} \right|}{\left| \omega_1^2 \bar{a} + \frac{GM}{R^3} \bar{R} \right|} \frac{\cos x \sin \gamma}{\sin^2 y}.$$

Тогда для экваториальной части Земли имеем:

$$\omega' \approx \frac{u \cos x}{a \sin^2 y} \approx \omega_1 \frac{\cos x}{\sin^2 y} \quad (41c)$$

Следовательно, для значения S_1 имеем приближенно:

$$S_1 = 2 [\bar{u} \omega'] = 2 \omega_1 u \frac{\cos x}{\sin^2 y} \sin \alpha,$$

при $u = 20 \frac{\kappa\mu}{\text{день}}$ находим:

$$S_{1\max} = 0,16 \frac{\cos x}{\sin^2 y} \frac{a.e.}{\text{лет}^2}.$$

Величина $\sin^2 y$ имеет период изменения звездных полусуток, так как $\bar{a}$ изменяет направление, имея период, рав-

ным периоду звездных суток, а $\bar{v}$ почти не изменяет направление.

$\cos x$ есть почти постоянная величина, ибо $[\bar{a} \bar{u}]$ направлен перпендикулярно к плоскости экватора Земли, а $\bar{v}$ не изменяет направление.

S_1 не направлена к центру Земли, она имеет компонент по горизонтали Земли, что может играть роль в образовании приливных волн.

Из уравнения (38) надо определить высоту приливной волны, происходящей вследствие влияния горизонтальных компонентов приливообразующих сил.

Но точно решить уравнение (38) трудно. Кроме этого надо учитывать, что по динамической теории в образовании приливных волн играют роль и свободные поступательные волны и морские течения.

Учитывая, что в образовании приливных волн играют роль силы F_1 , F_2 , S и S_1 , исходя из уравнений (35), (38) и учитывая результаты приближенных решений Эри, можно высоты приливных волн искать в качестве ряда:

$$h = c + \sum a_k \cos(\omega_k t + \varepsilon_k), \quad (45)$$

где ω_k может получить значения: ω_3 , $2\omega_3$, n , $2n$, $4n$, n_1 , $2n_1$, $4n_1$, n_2 , $2n_2$, $2n_3$, $2n_4$, $4n_4$ и т. д., ω_3 — угловая скорость звездных суток, n — угловая скорость лунных суток, n_1 — угловая скорость солнечных суток, n_2 — угловая скорость вращения Луны вокруг Земли, n_3 — угловая скорость вращения Земли вокруг Солнца, n_4 — угловая скорость лунно-солнечных суток (переменная) и т. д.

Отмеченные периоды изменения высот приливных волн главным образом объясняются тем, что силы ускорения S , S_1 , F_1 , F_2 имеют такие периоды изменения.

О периодах изменения ускорения S см. ниже.

§ 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТА S ПО ВЕРТИКАЛИ

Имеем для точки на экваторе Земли $S \approx 2[\bar{u} \bar{\omega}] = 2\omega u \sin(\bar{\omega}, \bar{u})$, где S находится в плоскости, перпен-

дикулярной $\bar{\omega}$. Эту плоскость обозначим через N . Величина $\sin(\bar{\omega}, \bar{u}) = \sin \alpha$ имеет переменный период изменения, ибо направление $\bar{\omega}$ изменяется, притом медленно и неравномерно, а направление $\bar{u}$ тоже изменяется, причем быстро и почти равномерно, имея период изменения, равный периоду звездных суток. Следовательно, период изменения $\sin(\bar{\omega}, \bar{u})$ будет отличаться от периода, равного половине периода звездных суток. Такие переменные периоды мы будем называть периодами лунно-солнечных суток, полусуток и т. д. соответственно.

Обозначим угол между n и $[\bar{\omega}, \bar{u}] = p$ через Θ . Тогда компоненты S по n и τ будут приближенно:

$$\begin{aligned} S_n &= 2 \omega n \sin \alpha \cos \Theta, \\ S_\tau &= 2 \omega n \sin \alpha \sin \Theta. \end{aligned} \quad (46)$$

Очевидно, что Θ имеет период изменения, близкий к периоду звездных суток, ибо 1) p и n находится в плоскости N , 2) n в этой плоскости изменяется очень медленно, так как оно перпендикулярно τ , а τ направлено по скорости $\bar{v}$, которая очень мало изменяет свое направление, потому что $\bar{v} = \bar{v}_2 + \bar{v}_3$, где $v_2 \ll v_3$, v_3 — скорость Солнца относительно инерциальной системы Вселенной, которая почти не изменяет свое направление, 3) период изменения p равен периоду звездных суток.

Таким образом получается, что изменения n (или $\bar{\omega}$) главным образом совершаются за счет изменения плоскости N , т. е. за счет изменения соприкасающейся плоскости кривой движения центра Земли.

Компонент S по вертикали данной точки Земли будет:

$$S_b = S_n \cos z + S_\tau \cos z_3, \quad (47)$$

где z — зенитное расстояние n , z_3 — зенитное расстояние τ ,

$$\begin{aligned} \cos z &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \\ \cos z_3 &= \sin \varphi \sin \delta_3 + \cos \varphi \cos \delta_3 \cos t_3, \end{aligned} \quad (48)$$

δ_3 — склонение, t_3 — часовой угол направления τ , φ — широта

места наблюдения, δ — склонение направления n , t — часовой угол направления n , что имеет переменный период изменения, близкий периоду лунно-солнечных суток, а значение δ изменяется медленно, что зависит от значений t_1 , t_2 , δ_1 , δ_2 (часовые углы и склонения Луны и Солнца соответственно). $\cos z_3$ имеет период изменения, равный периоду звездных суток, так как направление π почти не изменяется.

Из формул (46), (47) и (48) находим приближенно:

$$S_b = 2 \omega n \sin \alpha \cos \Theta (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t) + 2 \omega n \sin \alpha \sin \Theta \cos z_3 \quad (49)$$

Из значения S_b следует, что S_b имеет следующие периоды изменения:

а) лунно-солнечные периоды изменения 1) $\sin \alpha$ имеет переменный период изменения, равный $\frac{1}{2}$ периода лунно-солнечных суток, максимумы при 90° , минимумы при α и $90^\circ + \alpha$, где α — угол между плоскостями N и экватора Земли. 2) $\cos t$ имеет переменный период изменения, равный периоду лунно-солнечных суток.

б) Звездные периоды изменения.

1) $\sin \Theta \cos z_3$ имеет период изменения, близкий к половине периода звездных суток.

2) $\sin z_3$, $\cos \Theta$ имеют период изменения, близкий к периоду звездных суток.

Кроме этих периодов изменения, S_b имеет и другие периоды изменения, зависящие от членов $\left[\frac{d\omega}{dt} \bar{r} \right] \cdot [\bar{\omega} [\bar{\omega} \bar{r}]]$ и от других величин, входящих в S_b .

§ 7. О ПОТЕНЦИАЛАХ СИЛ F_{1b} , F_{2b} , S_b

Из формулы (4) видно, что потенциалы сил F_{1b} , F_{2b} будут:

$$V_3 = \frac{3}{2} \frac{Gm_1 a_0^2}{D_1^3} \left[\cos^2 z_1 - \frac{1}{3} \right], \quad V_4 = \frac{3}{2} \frac{Gm_2 a_0^2}{D_2^3} \left[\cos^2 z_2 - \frac{1}{3} \right] \quad (50)$$

соответственно.

Из формулы (49) получим потенциал силы S_b :

$$V_3 = a_0^2 \omega (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}) \cos \varphi \sin \alpha [\cos z \cos \Theta + \sin \Theta \cos z_3], \quad (50a)$$

где все обозначения имеют прежние значения.

$$a = a_0 \cos \varphi, \quad u = a (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}) = a_0 (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}) \cos \varphi.$$

Очевидно, что вертикал в данной точке не направлен по $\bar{a}_0$ ввиду существования ускорения $(\bar{\omega}_1 - \bar{\omega})^2 \bar{a}_1$, но при вычислении сил F_{1b} , F_{2b} , S_b и их потенциалов мы для простоты вычисления считаем, что вертикал направлен по $\bar{a}_0$.

§ 8. О СКОРОСТЯХ ВОД ОКЕАНА, ВОЗНИКАЮЩИХ ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИЛИВООБРАЗУЮЩИХ СИЛ F_1 , F_2

Мы выше видели, что когда действующие силы являются силами притяжения Земли и приливообразующими силами уравнения гидродинамики пишутся в форме (10). Эти формулы можно написать для сил F_{1r} , F_{2r} отдельно, откуда и определить скорость движения вод океана. Из решения Эри частного случая уравнений (10), когда считается, что по параллели и меридиану Земли есть узкие каналы, получается, что скорость воды есть периодическая функция от времени с периодами, равными периодам лунных суток, лунных полусуток, лунного полумесяца и т. д. Из этого результата можно предполагать, что скорость периодических движений вод, возникающих под действием приливообразующих сил F_1 , F_2 , будет периодической функцией от времени с периодами, равными периодам лунных суток, лунных полусуток, солнечным суткам, солнечным полусуткам, лунно-солнечным суткам, лунно-солнечным полусуткам, $1/4$ лунно-солнечных суток, лунному полумесяцу, полугоду и т. д.

В образовании приливных волн значительную роль могут играть те течения вод, скорость которых направлена по параллели Земли. Поэтому надо в основном учитывать скорости таких течений.

Обозначим скорость этих периодических течений через $\Delta \bar{v}$, компоненту скоростей остальных течений по параллели Земли через $\bar{u}_1$, тогда скорость вод по параллели Земли относительно оси вращения будет:

$$\bar{u} = \bar{u}_0 + \bar{u}_1,$$

$$\text{где } \bar{u}_1 = \bar{u}_1 + \Delta v, \bar{u}_0 = [\bar{\omega}_2 \bar{a}]. \quad (51)$$

ω_2 — угловая скорость вращения Земли в основной координатной системе.

§ 9. ОБСУЖДЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ВОПРОСОВ ПРИЛИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Из (28) имеем

$$\omega \simeq 6 \frac{\cos x}{\sin^2 y} \frac{1}{\text{лет}}$$

Мы выше показали, что $\sin y$ мало отличается от единицы, отсюда следует, что $\cos x$ тоже мало отличается от единицы. Следовательно, принимая $\frac{\cos x}{\sin^2 y} = 1$, находим:

$$\omega = 6 \frac{1}{\text{лет}}$$

Имеем $S \simeq 2 \omega u = 12 u$, отсюда,

$$\text{при } u = 0,4 \frac{\kappa \text{ м}}{\text{сек}}, \text{ получим} \quad (52)$$

$$S_{\max} = 0.96 \frac{\text{а.е.}}{\text{лет}^2}$$

Приливообразующее ускорение F_2 Солнца в максимуме будет:

$$F_{2\max} = \frac{2GMa}{R^3} = 0.0032 \frac{\text{а.е.}}{\text{лет}^2}. \quad (53)$$

а приливообразующее ускорение Луны F_1 в максимуме будет:

$$F_{1\max} = \frac{2Gma}{r^3} = 0.007 \frac{\text{а.е.}}{\text{лет}^2} \quad (54)$$

Из (52), (53) и (54) находим:

$$S_{\max} = 96 (F_{1\max} + F_{2\max}). \quad (55)$$

Выражение (55) получено для экватора Земли, а для остальных мест S будет меньше и приближенно:

$$S_z = S \cos \varphi, \quad (56)$$

где φ — широта места.

Минимальное значение S будет при минимуме угла $\alpha = \angle(\bar{\omega} \bar{u}) = 90^\circ - 23^\circ 30' = 66^\circ 30'$, так как $\bar{\omega}$ приблизительно перпендикулярна к плоскости эклиптики, а $\bar{u}$ есть скорость точки поверхности Земли относительно оси вращения Земли. Тогда имеем:

$$|S_{\min}| = |S_{\max}| \sin 66^\circ 30',$$

где

$$|S_{\max}| = 2 |(\bar{\omega} \bar{u})| = \omega u$$

Легко видеть, что угол между $S_{\max}$ и $\bar{a}$ равен $23^\circ 30'$, а угол между $S_{\min}$ и $\bar{a}$ равен 0° , где $\bar{a}$ есть радиус параллельного круга Земли.

Следовательно, угол между $\bar{r}$ и $S_{\max}$ будет $\varphi - 23^\circ 30'$, а угол между $\bar{a}$ и $S_{\min}$ будет φ .

Тогда компоненты $S_{\max}$ и $S_{\min}$ по вертикали Земли будут:

$$S_{\max b} = |S_{\max}| \cos(\varphi - 23^\circ 30'),$$

$$S_{\min b} = |S_{\min}| \cos \varphi = |S_{\max}| \cos \varphi \sin 66^\circ 30'$$

Амплитуда изменения S_b выразится

$$A_{S_b} = |S_{\max}| [\cos(\varphi - 23^\circ 30') - \cos \varphi \sin 66^\circ 30']$$

При $\varphi = 23^\circ 30'$, находим:

$$A_{S_b} = 0.152 \frac{\text{а. е.}}{\text{лет}^2} \quad (a)$$

Для максимального значения амплитуды изменения силы F_{1b} Луны получим:

$$A_{F_{1b}} = 0.010 \frac{\text{а. е.}}{\text{лет}^2} \quad (b)$$

Из (a) и (b) находим:

$$\frac{A_{S_b}}{A_{F_{1b}}} = 15$$

Эта грубая оценка показывает, что ускорение S в приливных явлениях Земли должно играть значительную роль.

Во время сизигий моменты полных вод могут не совпадать с моментом кульминации Луны и Солнца, ибо период изменения ускорений S и S_1 различается от периодов приливных ускорений F и F_1 Луны и Солнца. Той же причиной объясняется то, что в ряде мест самые большие полные воды не бывают во время сизигий, а бывают позже или раньше его.

Суточное неравенство во всех местах той же параллели может не быть одинаково, ибо из значения S и S_1 этого не следует. На экваторе может быть суточное неравенство полных вод, ибо из значения S и S_1 следует возможность такого явления.

Из значений ускорений F_1 , F_2 , S и S_1 следует, что близ экватора Земли иногда могут образоваться очень большие приливные волны, ибо в этих частях Земли скорость точки поверхности относительно оси вращения Земли большая величина, и максимумы разных волн по временам могут совпадать, что и подтверждается наблюдением. Это вытекает как из статической, так и из динамической теорий.

Но имея в виду, что условия на Земле отличаются от принятых этими теориями, в действительности волны могут не быть настолько большими.

Согласно статической теории, в образовании приливных волн играют роль только вертикальные компоненты приливообразующих сил, особенно добавочной силы S , а вертикальные компоненты приливообразующих сил F_1 и F_2 Луны и Солнца играют второстепенную роль.

Выше мы пришли к выводу, что ускорение S в статической теории приливов и отливов играют главную роль. С другой стороны, в динамической теории роль играют силы F_1 , F_2 и S_1 . Но учитывая, что в обеих теориях для образования приливных волн особое значение имеют местные условия, трудно теоретически предусмотреть высоту приливных волн.

Добавочные ускорения S и S_1 имеют периоды, близкие к периодам звездных суток и звездных полусуток, а в

выражениях $S \approx 2 [\bar{u}_0 \bar{\omega}]$ и $S_1 \approx 2 [\bar{u}_1 \bar{\omega}']$ векторы $\bar{\omega}$ и $\bar{\omega}'$ составляют друг с другом острый угол, равный приблизительно $23^\circ 30'$. Следовательно, морские волны, образовавшиеся под воздействием сил S и S_1 и имеющие такие периоды изменения, суммируются, когда $\bar{u}_0$ и $\bar{u}_1$ имеют одинаковые направления и отнимаются, когда они имеют противоположные направления.

Следовательно, в отдельных случаях, когда в морских течениях участвует много вод и скорость $\bar{u}_1$ велика, а напряжение $\bar{u}_1$ совпадает с направлением $\bar{u}_0$, высоты полных вод может быть большой. Но когда $\bar{u}_0$ и $\bar{u}_1$ имеют противоположные направления, то тогда в результате получаются волны меньшей амплитуды.

Наблюдения подтверждают эти заключения. Сравнение карт морских течений и приливов показывают, что там, где $\bar{u}_0$ и $\bar{u}_1$ имеют одинаковые направления, там бывают полные воды с большими высотами, а там, где $\bar{u}_0$ и $\bar{u}_1$ имеют противоположные направления, там высоты приливов меньше. Так, например, по берегу северо-восточной части Латинской Америки, где бывает южно-пассатное (экваториальное) морское течение, у которого $\bar{u}_1$ направлено на запад, высоты приливов меньше, чем вдоль южно-восточной части Латинской Америки, где есть более слабое морское течение, но где направление $\bar{u}_1$ совпадает с направлением $\bar{u}_0$.

В Аравийском море по берегу Индии, где $\bar{u}_0$ и $\bar{u}_1$ совпадают, высоты волн достигают 12 м. В проливе Ламанш, где $\bar{u}_0$ и $\bar{u}_1$ тоже совпадают, высоты волн достигают 15 м. А по берегу Канады, где действует сильное морское течение Гольфстрим и где $\bar{u}_0$ и $\bar{u}_1$ совпадают, высота приливной волны достигает 18 м.

По западному берегу материков, где $\bar{u}_0$ и $\bar{u}_1$ имеют противоположные направления, высота волн не превышает 5—6 м, а по восточному берегу, где $\bar{u}_0$ и $\bar{u}_1$ имеют одно направление, высота волн достигает 15—18 метров.

Учитывая, что периоды волн, образующихся под воздействием приливных сил F_1 , F_2 , S и S_1 , не совпадают, а

также то, что их значения изменяются со временем, причем значения S и S_1 изменяются нерегулярно. можно сказать, что высоты полных и малых вод, а также промежутки между полными и малыми водами будут изменяться, причем это изменение не будет иметь регулярного характера.

Мы выше отметили, что высоты полных и малых вод, а также последовательные промежутки между этими водами изменяются. Из изложенного следует, что волны, образованные под воздействием сил S и S_1 , должны иметь менее регулярный характер, чем те, которые образуются под воздействием сил F_1 и F_2 Луны и Солнца. Очевидно, что момент полных вод этих волн может не совпадать с моментом кульминации Луны или Солнца.

Высоты приливов в разных местах Земли будут разными, ибо они зависят от широты места.

1. В уравнениях динамической теории следует учитывать добавочное ускорение, возникающее оттого, что частица земного океана движется относительно точки равновесия, а последняя в пространстве имеет криволинейное движение. Это добавочное ускорение имеет период изменения, равный периоду звездных суток и звездных полусуток. Вычисления показывают, что им нельзя пренебречь по сравнению с приливным ускорением от Луны и Солнца.

2. В классической статической теории приливов не учтено добавочное ускорение, происходящее оттого, что частица земного океана вращается вокруг оси вращения Земли, которая имеет криволинейное движение. Отсюда следует, что эта задача решена неполностью.

Вычисления показывают, что это ускорение в экваториальных частях Земли вообще больше, чем приливообразующие ускорения F_1 и F_2 Луны и Солнца. В приливном явлении на поверхности Земли добавочные ускорения играют важную роль.

3. Приливные волны, имеющие периоды, близкие к звездным суткам и полусуткам, образуются главным образом под воздействием добавочных ускорений, в которых есть составляющие ускорения, имеющие периоды, близкие к периодам звездных суток и звездных полусуток.

4. Несовпадение момента самых больших полных вод с момента сизигий главным образом объясняется тем, что добавочные ускорения имеют периоды изменения, которые несовпадают с периодами наблюдаемого обращения светил (Луны и Солнца) вокруг Земли.

5. Морские течения также влияют на явление приливов и отливов. Те морские течения, которые направлены на восток, усиливают приливные явления. Об этом свидетельствует существование больших приливных волн в тех местах океанов, где есть сильные морские течения, направленные на восток.

ՈՒ Հ. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

ՄԱԿԸՆԹԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԵՎ ՏԵՂԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ա. մ փ ո փ ու մ

Մակընթացության դինամիկ տեսության հավասարումների մեջ հաջվի չի առնված լրացուցիչ արագացումը, որը առաջանում է երկրազնդի մասնիկի և հավասարակշռման կետի հարաբերական շարժման ու հավասարակշռման կետի տարածության մեջ կորագիծ շարժման հետևանքով: Այդ արագացումը առաջացնում է պարբերական շրջաններ, որոնք մոտ են աստղալին օրվան և աստղալին կետավան: Հաշվումները ցույց են տալիս, որ Լուսնի և Արեգակի մակընթացային արագացումների համեմատությամբ, այդ արագացումը չի կարելի արհամարհել:

Օվկիանոսների վրա կատարվող մակընթացային երևույթների խնդրի լուծման ժամանակ Նյուտոնի, Բեռնուլլիի, և այլ գիտնականների կողմից, հարաբերական շարժման հավասարման մեջ հաջվի չի առնված լրացուցիչ արագացումը, որը առաջանում է երկրազնդի կենտրոնի կորագիծ շարժման հետևանքով:

Հաշվումները ցույց են տալիս, որ այդ արագացումը երկրազնդի հասարակածային գոտում ընդհանրապես ավելի մեծ է քան Լուսնի և Արեգակի մակընթացային արագացումները: Հետադառությունները ցույց են տալիս, որ երկրազնդի մակերևույթի վրա կատարվող մակընթացային երևույթների մեջ լրացուցիչ արագացումները կատարում են զգալի դեր:

Ամենարարժք ջրերի և Լուսնի ու Արեգակի համատեղ կուլմանացիայի մոմենտների չհամընկնումը բացատրվում է նրանով,

որ լրացուցիչ արագացումները ունեն փոփոխման պերիոդներ. որոնք չեն համընկնում լուսաստուների ներկրագնդի շուրջը դիտվող պտտման պերիոդների հետ:

Մակընթացային ալիքները, որոնք ունեն ամպլիտուդային փոփոխման պերիոդներ մոտիկ աստղային օրվա և աստղային կեսօրվա, առաջանում են լրացուցիչ արագացումների շնորհիվ. որոնցում կան բաղադրիչ արագացումներ, որոնք ունեն փոփոխման պարբերություններ մոտիկ աստղային կեսօրվա և աստղային օրվա պարբերություններին:

Ծովային հոսանքները նույնպես ազդում են մակընթացության և տեղառվածության երևույթների վրա: Այն ծովային հոսանքները, որոնք ուղղված են դեպի արևելք, ուժեղացնում են մակընթացային երևույթները: Այդ մասին են վկայում մակընթացային մեծ ալիքները այն տեղերում, որտեղ կան ուժեղ ծովային հոսանքների ուղղված դեպի արևելք:

R. A. SAAKYAN

ON TIDES AND EBBS

S u m m a r y

In the equations of the dynamic theory of tides the additional acceleration is not taken into account which is due to the motion of a particle of the Earth relative to the equilibrium point and the curvature of the trajectory of motion of the equilibrium point. This acceleration has variable periods, approximating to the sidereal day and half a sidereal day. Calculations show that this acceleration, compared to the tide accelerations caused by the Moon and the Sun, cannot be neglected.

Calculations have shown that this acceleration at the equator of the Earth is greater than the tide acceleration caused by the Moon and the Sun. The investigation shows that the additional accelerations in the tide phenomena on the Earth's surface play a considerable role.

The noncoincidence of joint culmination moments of the Moon and the Sun with the highest tides is explained by the fact that the additional accelerations have variable periods which do not coincide with the periods between that culminations.

Sea currents too influence the tides. The currents to the east strengthen the tides. We see greater waves of high tides in the places where the stronger streams are directed to the east.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе*, Теоретическая гидромеханика 1955, М., 524, 530, 531.
2. *Р. А. Саакян*, Астрономический журнал, **39**, 931, 1962.
3. *С. П. Фиников*, Дифференциальная геометрия, 126, 130, 135, М. 1936.
4. *Д. Г. Дарвин*, Приливы и родственные им явления в солнечной системе, М.—П. 1923.
5. *Ю. М. Шокольский*, Океанография, Л. 1959.
6. *Н. Н. Зубов*, Динамическая океанология, М.—Л. 1947.
7. Большая Советская Энциклопедия, Т. 34, 512, М. 1955.