УДК 525.2 : 523.3

А. Т. АСЛАНЯН

К ДИНАМИКЕ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ-ЛУНА

За последние годы несколькими независимыми методами было установлено, что замедление движения Луны по орбите и соответственно удаление Луны от Земли происходят значительно более быстрыми темпами, чем это предполагалось раньше по оценкам, основанным на недостаточно строго документированных древних хрониках солнечных затмений. На основании обработки данных наблюдений в Гринвичской обсерватории за 40.000 покрытиями Луной звезд за 1942—1973 гг. было установлено, что орбитальное ускорение Луны (замедление обращения вокруг Земли) в шкале эфемеридного времени составляет $dn/dt = \dot{n} = -42'' \pm 6'' \text{ век}^{-2} = -1,875 \cdot 10^{-23} \text{ рад/сек}^2$, при этом применялась атомная шкала времени, позволяющая исключить из наблюдений искажающее влияние нерегулярных флюктуаций во вращении Земли (см. Л. Моррисон, 1973; П. Мельхиор, 1977). Эта оценка $\dot{n}$ вдвое больше ранних оценок Джонса, Дикке ($22,44'' \text{ век}^{-2}$) и др., широко использованных в литературе последних 40 лет [см. 7, 8, 10—13]. Некорректность методики исследований, применявшейся Джонсом, была выявлена Р. Р. Ньютоном [21], который в 1970 г., анализируя данные по наиболее продолжительным солнечным затмениям за период в 500 лет до нашей эры, получил $\dot{n} = 41,8'' \pm 4,3'' \text{ век}^{-2}$, т.е. результат, полностью совпадающий с новыми результатами Гринвичской обсерватории [см. 11]. Как будет показано ниже, эта оценка находится в удовлетворительном согласии также с палеонтологическими и другими астрономическими данными об изменении продолжительности суток.

Пользуясь новыми значениями $\dot{n} = 42'' \text{ век}^{-2}$, рассмотрим некоторые вопросы эволюции системы Земля-Луна.

(1). Оценим скорость удаления Луны от Земли, полагая ее орбиту в первом приближении круговой. Обозначим радиус орбиты a , массу Земли M , массу Луны m , гравитационную постоянную G , угловую скорость движения Луны по орбите n , время t и выразим третий закон Кеплера в виде $n^2 a^3 = G (M + m)$. Дифференцируя это выражение, получаем известную расчетную формулу [см. 13, 16]

$$\frac{da}{dt} = -\frac{2}{3} \frac{a}{n} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1)$$

Подставляя сюда известные значения $a = 384000 \text{ км}$, $n = 1,74 \cdot 10^9'' \text{ век}^{-1}$, $dn/dt = \dot{n} = 42'' \text{ век}^{-2}$, получим $da/dt = -6,2 \text{ см/год}$ и далее экстраполируя эту оценку в линейном виде в будущее время, к моменту зарождения и индивидуализации Луны, получим оценку

минимального начального расстояния между Землей (современный радиус $R=6371$ км) и Луной, равную $a = a_0/6$ или $a = 10R$.

(2). Для Луны, движущейся по круговой орбите в экваториальной плоскости Земли, из известных уравнений Гаусса, описывающих аналогичную модель, выводится расчетная формула, определяющая расстояние a между Луной и Землей в зависимости от времени t их приливной эволюции

$$a^{13/2} = a_0^{13/2} + 13 A \mu^{-1/2} \cdot t \sin 2\delta. \quad (2)$$

Здесь a_0 —современный радиус орбиты Луны, $A = 3GM R^5 k/2$, $\mu = G(M+m)$, k —второе приливное число Лява (равное 0,3017), δ —угол между направлением приливообразующей силы и линией, соединяющей приливные выступы Земли (угол запаздывания приливного выступа). Принимая по формуле (2) a_0 за единицу и выражая a в долях этой единицы, а время в 10^9 лет и подставляя значения A и μ , получаем $a = (1 + 7,563 t \sin 2\delta)$, причем в случае $a \ll a_0$ это выражение переходит в простую формулу

$$t = \frac{10^9}{7.563 \cdot \sin 2\delta} \text{ лет}. \quad (3)$$

Анализ чандлеровских колебаний полюсов Земли дает $\delta = 50'$ (минимально возможное значение этого угла по Макдональду $40'$) и соответственно значение диссипативной функции $Q = 1/\text{tg } 2\delta = 35$ [см. 10, 16]. Отсюда получаем $t = 4.56 \cdot 10^9$ лет, что приблизительно совпадает с оценкой, полученной по формуле (1).

Ряд исследователей считает, что Луна образовалась вероятнее всего на расстоянии в пределах от $10R$ до $30R$ от Земли. П. Гольдрайх [6] детально изучил связь между наклоном лунной орбиты к эклиптике и наклоном к земному экватору и получил эмпирическое правило, которое, по его словам, «выполняется с удивительной точностью: на каждый 1° отклонения лунной орбиты от плоскости эклиптики при современном значении $a = 60R$ приходится 2° отклонения орбиты от плоскости экватора при $a = 10R$ и соответственно современный наклон лунной орбиты к эклиптике в 5° дает наклон в 10° к экватору при $a = 10R$ ». Указанный автор считает, что Луна образовалась на расстоянии не менее $10R$, поскольку, по его расчетам, при $a < 10R$ предельное значение наклона лунной орбиты к экватору никогда не бывает меньше 10° . Приведенные новые данные об ускорении Луны указывают на возможность ее первичной индивидуализации на критическом расстоянии от Земли $a = 10R$.

Укажем, что принятие в расчет старой заниженной оценки $n = 22,4'' \text{ век}^{-2}$ давало, естественно, совершенно другие результаты. В частности, получалось так, что Луна была ближе всего к Земле $t = 1,75 \cdot 10^9$ лет т. н. и находилась на расстоянии $a = 23,5R$ [10, 13, 16].

(3). Изменение радиуса орбиты Луны сопровождается изменением момента количества вращательного движения Земли согласно формулам [6, 10]:

$$H - H_0 = m\mu^{1/2} (a^{1/2} - a_0^{1/2}) \quad (4)$$

$$\frac{T_0}{T} = 5.95 - 4.95 a^{1/2}, \quad (5)$$

где H и H_0 моменты количества вращательного движения на расстояниях a и a_0 от Земли, а T_0 и T — продолжительность суток в современную эпоху при a_0 и в прошлом при текущем расстоянии a . При этом предполагается, что приливному торможению Земли никакие силы не препятствовали (в этих формулах за единицу расстояния принимается современное расстояние Земля-Луна a_0 , а текущее расстояние a измеряется в долях $a_0 = 1$). Для учета последнего обстоятельства необходимо принимать во внимание следующие данные.

Расчетная (теоретическая) величина приливного торможения Земли, вращающейся с угловой скоростью $\omega = 2\pi/T$, складывается из трех составляющих:

(а) Замедление вращения со стороны Луны: $(\dot{\omega}/\omega)_1 = 0,94 \cdot 10^{-9} \text{ н век}^{-1}$.

(б) Замедление вращения со стороны Солнца в пределах от $(\dot{\omega}/\omega)_2 = 0,18 \cdot 10^{-9} \text{ н век}^{-1}$ до $(\dot{\omega}/\omega)_2 = 0,27 \cdot 10^{-9} \text{ н век}^{-1}$, соответствующих в первом случае теоретическому максимуму отношения лунного приливного момента к солнечному приливному моменту 5,1, а во втором случае модели, для которой это отношение составляет 2/3 от первого и равняется 3,4.

(в) Ускорение вращения Земли, обусловленное влиянием солнечного момента сил $-0,30 \cdot 10^{23} \text{ эрг}$ на атмосферу: $(\dot{\omega}/\omega)_3 = +1,6 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}$.

Подставляя в эти выражения новое значение $n = -42'' \text{ век}^{-2}$ и суммируя эффекты (а), (б), (в), получим полную величину относительного уменьшения угловой скорости вращения Земли, обусловленного лунно-солнечными приливыми силами, в пределах значений $47 \cdot 10^{-9} - 51 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}$. Ниже мы будем пользоваться средней из этих величин $(\dot{\omega}/\omega)_f = -49 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}$.

Расчетная формула для определения фактического (наблюденного) значения относительного изменения скорости вращения Земли имеет вид

$$(\dot{\omega}/\omega)_f = -15,4 \cdot 10^{-9} l' \text{ век}^{-1}, \quad (6)$$

где l' — т. н. «вековое ускорение Солнца», интерпретируемое как замедление скорости вращения Земли по отношению к однородной шкале эфемеридного времени. Современное значение l' , соответствующее новому значению $n = -42'' \text{ век}^{-2}$, оценивается в $1,82'' \text{ век}^{-2}$ и таким образом получается $(\dot{\omega}/\omega)_f = -28 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}$. Следовательно, разница между теоретическим значением $(\dot{\omega}/\omega)_f$ и наблюдаемым значением $(\dot{\omega}/\omega)_f$ составляет $(\Delta\dot{\omega}/\omega)_d = 21 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}$ и оказывается, что существует мощный механизм, препятствующий замедлению вращения Земли лунно-солнечными приливыми силами.

Указанный вывод подтвержден палеонтологическими данными, ука-

зывающими на последовательное уменьшение продолжительности суток вглубь времени.

Изучение особенностей роста отдельных особей кораллов, плеченогих и двустворчатых из морских отложений силура, девона, карбона, перми и мела дало возможность определить в полосчатой структуре роста этих организмов как число суток в году, так и число суток в месяце (данные Уэллса, 1964; Панеллы и соавторов, 1968; Берри и Паркера, 1968; Кларка, 1968; Маццуро, 1971; Ловеринга и соавторов, 1972) [см. 3, 4, 10, 11, 19, 20]. Наиболее точными следует считать данные по силуру и девону. С. Маццуро [20], изучая срезы полосчатых структур кораллов и плеченогих, установил, что в раннем силуре (435—440 млн. лет т. н.) в году было 421 сутки, в среднем силуре 419 суток, в среднем девоне (эйфельский век—370 млн. лет т. н.) 410 суток. Позднее М. Ловеринг, С. Дилл и М. Джохансен [19], также изучая раковины ископаемых двустворчатых из нижнего силура, показали, что в это время год состоял из 421 коротких суток, продолжительностью $T < T_0 = 24$ ч

Поскольку для современных кораллов в годовой полосе роста имеется в среднем 365 суточных линий с продолжительностью суток $T_0 = 24$ ч., то из условия $421 \text{ сутки} \times T = 365 \text{ суток} \times 24 \text{ ч.}$, получается продолжительность суток в начале силура около 21 ч. и соответственно значение $(\dot{\omega}/\omega)_f = 27 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}$. Эта оценка фактического значения замедления вращения Земли совпадает с той оценкой, которая получается из современных (новых) значений $\dot{n}$ и $\dot{l}'$, а также с оценкой Р. Ньютона, полученной по наиболее продолжительным солнечным затмениям [21].

В предыдущих наших работах было показано, что приливному торможению Земли препятствует в основном уменьшение объема Земли [2, 3, 4]. При гомологическом сжатии Земли (когда в ходе изменения объема планеты все частицы остаются в одном и том же окружении) из закона постоянства углового момента следует пропорция

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{2\Delta R}{R} = \frac{\Delta \omega}{\omega},$$

где ΔT , ΔR и $\Delta \omega$ —малые изменения продолжительности суток, радиуса и угловой скорости вращения Земли.

Изменению радиуса на величину $\Delta R = 6,37$ см соответствует относительное увеличение скорости вращения за 100 лет $\dot{\omega}/\omega = 21 \cdot 10^{-9}$, что равняется указанной выше разности между теоретическим значением $(\dot{\omega}/\omega)_f = -49 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}$ и наблюдаемым значением $(\dot{\omega}/\omega)_f = -28 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}$.

Можно также отметить, что оценка $\Delta R = \Delta R_0 = 1,6$ см за 25 лет довольно точно удовлетворяет выведенному автором [2, 18] уравнению для чандлеровской нутации

$$\frac{\Delta J}{J} = \frac{2\Delta R_0}{R} = f \Delta \beta = 2,31 \cdot 10^{-9},$$

где $\Delta J/J$ —относительное изменение момента инерции Земли, f —динами-

ческое сжатие, равное $1/305,51$ а $\Delta\beta$ —амплитуда колебания полюса, равная $7,06 \cdot 10^{-7}$ рад (среднеквадратичное значение).

При времени затухания колебания полюса в 12,5 лет угол β меняется на $0,14''$ (на 4,5 м по меридианному кругу) при уменьшении радиуса Земли на $\Delta R = 1,6$ см [см. 2, 3, 4, 1, 18].

Указанное выше уравнение (5) при критическом значении $a = 10R = a_0/6$ дает $T_0/T = 3,93$ и, если полагать $T_0 = 24$ ч., то получим продолжительность суток в период, когда Луна находилась на расстоянии $10R$ от Земли, $T = 6,11$ ч. Если же в соответствии с приведенными выше данными считать, что при отсутствии сжатия Земли замедление приливным торможением должно было быть сильнее и продолжительность суток была бы не 24 ч., а 26 ч., то тогда получили бы для орбиты $a = 10R$, $T = 6,62$ ч.

Согласно приведенным выше расчетам, в протерозое ($2 \cdot 10^9$ лет т. н.) Земля должна была вращаться в два раза быстрее, чем сейчас и полярное сжатие ее должно было быть в четыре раза больше, чем сейчас ($\epsilon = 1/75$). При модуле упругости гнейсов $E = 750.000$ кг/см² внутреннее напряжение в земной коре должно было порядка $\sigma \approx \epsilon E = 10.000$ кг/см² и кора в то время должна была быть расчлененной разломами на большое число блоков. Вместе с этим окружность Земли за послепалеозойское время должна была уменьшиться примерно на 9000 км (при темпе сокращения радиуса 6,37 см за 100 лет), причем эффект сжатия должен был концентрироваться в основном в геосинклинальных поясах и срединно-океанических хребтах (выступающих в роли пластических шарниров). Указанный масштаб контракции Земли полностью объясняет все большие деформации земной коры, в частности складчатость и шарьяжи в геосинклиналях.

В заключение хотелось бы отметить, что полученный выше результат об образовании Луны на критическом расстоянии $10R$, $4,5$ — $4,6 \cdot 10^9$ лет т. н., не противоречит широко распространенной точке зрения ряда исследователей [1, 9, 14, 15, 17] и, в частности, мнению покойного акад. А. П. Виноградова о том, что «аккреция вещества Луны происходила вблизи Земли и развивалась под ее эгидой» [5, стр. 5].

Такой вывод лучше согласуется также с фактами палеонтологического характера, в частности с фактом существования остатков и продуктов жизнедеятельности водорослей в архейских породах вплоть до слоев с возрастом 3,3 млрд. лет.

Ա. Տ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ

ԵՐԿԻՐ-ԼՈՒՍԻՆ ՍԻՍՏԵՄԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ՇՈՒՐՋԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Օգտագործելով նորագույն տվյալներն այն մասին, որ Լուսնի ուղեծրային արագությունը $dn/dt = \dot{n} = -42'' (100 \text{ տարի})^{-2}$, Լրեբգակի կարծեցյալ արագացումը $l' = 1,82'' (100 \text{ տարի})^{-2}$, Երկրի առանցքային պտույտի մակրնթաքային արգելակման տեսական արժեքը $(\omega/\omega)_t = -49'' / (100 \text{ տարի})$, փաստական արժեքը $(\omega/\omega)_f = -28'' / (100 \text{ տարի})$, շառավղի փոքրացման հետևանքով առաջացող արագացումը $(\omega/\omega)_d = (\omega/\omega)_t - (\omega/\omega)_f = +21'' / (100 \text{ տարի})$, Երկիր-Լուսին հեռավորությունը $a_0 = 38400$ կմ, Երկրի առանցքային պտույտի տևողությունը $T_0 = 24$ ժ, Երկրի շառավղի շափր $R = 6371$ կմ, պարզվել է, որ

$$\frac{da}{dt} = -\frac{2}{3} \frac{a_0}{n} \frac{dn}{dt} ; \quad \frac{T_0}{T} = 5,95 - 4,95 \cdot a^{1/2}$$

բանաձևերի համաձայն $4,56 \cdot 10^9$ տարի սրանից առաջ Լուսինը գտնվել է Երկրից $a = 10R \approx 64000$ կմ հեռավորության վրա, իսկ Երկիրը պտտվել է իր առանցքի շուրջը $T \approx 6$ ժ պարբերությամբ:

A. T. ASLANIAN

ON THE DYNAMICS OF THE EARTH-MOON SYSTEM.

S u m m a r y

Using the following new results i. e. the Moon orbital velocity $dn/dt = \dot{n} = -42'' (100 \text{ years})^{-2}$, the "Sun acceleration" $l' = 1,82'' (100 \text{ years})^{-2}$, the Earth axis rotation tidal breaking theoretic value $(\omega/\omega)_t = -49'' / (100 \text{ years})$, the actual value $(\omega/\omega)_f = -28'' / (100 \text{ years})$, the origin of the acceleration on account of reduction of the radius $(\omega/\omega)_d = (\omega/\omega)_t - (\omega/\omega)_f = +21'' / (100 \text{ years})$ the Earth-Moon distance $a_0 = 384000 \text{ km}$, the duration of the Earth axis rotation $T_0 = 24 \text{ h}$, the size of the Earth radius $R = 6371 \text{ km}$, according to these equations,

$$\frac{da}{dt} = -\frac{2}{3} \frac{a_0}{n} \frac{dn}{dt} ; \quad \frac{T_0}{T} = 5,95 - 4,95 \cdot a^{1/2}$$

$4,56 \cdot 10^9$ years ago the Moon appeared to have been at the distance of $a = 10R \approx 64000 \text{ km}$ from the Earth, and the Earth has been rotated around axis $T \approx 6 \text{ h}$ periodically.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Андерсон Д. Л. Происхождение и состав Луны. Сб. «Космохимия Луны и планет», «Наука», М., 1975.

2. Асланян А. Т. Возбуждение чандлеровских колебаний полюса как проявление контракции Земли, Известия АН Арм. ССР, Науки о Земле, №4—5, 1977.
3. Асланян А. Т. К расчету вековой скорости изменения радиуса Земли. Известия АН Арм. ССР, Науки о Земле, № 5, 1978.
4. Асланян А. Т. Новые данные об изменении вековой скорости Земли и их значение для геологической науки (в печати), 1979.
5. Виноградов А. П. Дифференциация вещества Луны. Сб. «Космохимия Луны и планет»; «Наука», М., 1976.
6. Гольдрайх П. История лунной орбиты. Сб. «Приливы и резонансы в солнечной системе», «Мир», М., 1975 (1966).
7. Дикки Г. Теория гравитации и наблюдения. «Эйнштейновский сборник», «Наука», М., 1970.
8. Джеффрис Г. Земля. ИЛ., М., 1960.
9. Жарков В. Н., Трубицын А. П. Об истории лунной орбиты. Ж. «Физика Земли», № 8, 1976
10. Макдональд Г. Дж. Ф. Приливное трение. Сб. «Приливы и резонансы в солнечной системе», «Мир», М., 1975 (1965).
11. Мельхиор П. Физика и динамика планет, т. II, «Мир», М., 1976.
12. Моррисон Л. Вековые ускорения орбитального движения Луны и вращения Земли. Сб. «Приливы и резонансы в солнечной системе», «Мир», М., 1975 (1972).
13. Каула У. М. Введение в физику планет земной группы. «Мир», М., 1971 (1968).
14. Каула У. М. Механические процессы, влияющие на дифференциацию протолунного вещества. Сб. «Космохимия Луны и планет», «Наука», М., 1975.
15. Рускол Е. Л. Происхождение Луны. «Сб. «Космохимия Луны и планет», «Наука», М., 1975.
16. Стейси Ф. Физика Земли. «Мир», М., 1972 (1969).
17. Юри Г. Происхождение Луны и солнечной системы. Сб. «Луна», «Мир», М., 1975.
18. Aslanian A. T. Excitation of the pole Chandler wobble as the stress reaction on the gravitational contraction of the Earth. Problems of Planetology, vol. 2, IAP Yerevan, 1977.
19. Lovering M. F., Dell C. I., Johanson M. I. Effect of a shorter day upon biotic diversity. Bull. Geol. Soc. Amer., 83, 3523, 1972.
20. Mazzullo S. I. Length of the years during the Silurian and Devonian periods (new data). Bull. Geol. Soc. Amer. 82, 1085—1086, 1971.
21. Morrison L. V. Rotation of the Earth from AD 1663—1972 and the Constancy of G. Nature, vol. 241, № 5391, 1973.
22. Newton R. R. Ancient Astronomical Observations and the Accelerations of the Earth and Moon. John Hopkins Press., London, 1970.