

УДК 551.465.7

ДЕЙСТВИЕ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ПРИЛИВООБРАЗУЮЩИХ СИЛ
НА ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯВ.Б.Ржонсницкий, Н.В.Михайлова
АзчерНИРО

Приливные движения каждой единицы массы представляют собой вынужденные колебания, возбуждаемые действием горизонтальных составляющих приливообразующих сил Луны и Солнца. Амплитуды вынужденных колебаний прямо пропорциональны амплитудам возбуждающих сил. Поэтому для изучения особенностей изменения приливов во времени необходимо установить закономерности хода амплитуд горизонтальных составляющих приливообразующих сил Луны и Солнца. Величина горизонтальной составляющей F , вызванной действием любого из этих светил, складывается из F_n, F_c и F_a , изменяющихся во времени с полусуточным, суточным и долгим периодами:

$$F = F_n + F_c + F_a = C \cdot \text{tg}^3 R \cdot \text{Cos}^2 \delta \cdot \sqrt{\text{Cos}^2 \varphi \cdot \text{Sin}^2 2t + \text{Sin}^2 2\varphi \cdot \text{Cos}^2 2t} + \\ + C \cdot \text{tg}^3 R \cdot \text{Sin} 2\delta \cdot \sqrt{(\text{Sin}^2 \varphi - \text{Cos}^2 2\varphi) \cdot \text{Sin}^2 t + \text{Cos}^2 2\varphi} - \\ - C \cdot \text{tg}^3 R \cdot \frac{1}{2} \cdot \text{Sin} 2\varphi (1 - 3 \text{Sin}^2 \delta), \quad (I)$$

- где R - видимый горизонтальный полудиаметр светила;
 δ - склонение светила;
 t - его часовой угол;
 φ - географическая широта места;
 C - постоянные для Луны и Солнца величины, равные соответственно 891 и 375 дин.

Условимся называть медленно изменяющиеся во времени величины F_n, F_c и F_A , равные соответственно $C \cdot \text{tg}^3 R \cdot \text{Cos}^2 \delta$, $C \cdot \text{tg}^3 R \cdot \text{Sin}^2 \delta$ и $C \cdot \text{tg}^3 R (1 - 3 \text{Sin}^2 \delta)$, амплитудами компонентов полусуточного, суточного и долгого периодов. Амплитуды полусуточных, суточных и долгопериодных приливов, вызванных действием как Луны, так и Солнца, в любом районе Мирового океана прямо пропорциональны амплитудам F_n°, F_c° и F_A° а поэтому для установления особенностей изменения приливов во времени достаточно найти закономерности изменения величин F_n°, F_c° и F_A° , аргументами которых являются только видимый горизонтальный полудиаметр и склонение.

Рассмотрим особенности изменения амплитуд приливообразующих сил, вызванных действием Солнца и Луны, в отдельности. Период изменения видимого горизонтального полудиаметра Солнца, называемый в астрономии аномалистическим годом, равен 365,26 суток. Видимый горизонтальный полудиаметр Солнца достигает максимальной величины приблизительно 4 января, когда Земля находится в перигелии — ближайшей к Солнцу точке земной орбиты. Минимальную величину этот астрономический параметр имеет 4 июля, когда Земля находится в наиболее удаленной от Солнца точке орбиты (афелии). Значения этого астрономического параметра в каждую календарную дату из года в год изменяются в очень незначительных пределах. Так, в 1900, 1905, 1910, 1915, 1920, 1925 — 1960 гг. разность между наибольшим и наименьшим из максимальных значений видимого горизонтального полудиаметра ($16' 17,92''$ и $16' 17,36''$) составляла лишь 0,56. В те же годы разность между наибольшим и наименьшим из минимальных значений этого параметра ($15' 45,67''$ и $15' 45,31''$) имела еще меньшую величину (0,36").

Период изменения склонения Солнца, называемый тропическим годом, равен 365,24 суток. Солнце имеет максимальное северное склонение 22 июня, а максимальное южное — 22 декабря. В указанные годы разность между наибольшим и наименьшим из максимальных северных склонений Солнца ($23^\circ 27' 40,5''$ и $23^\circ 26' 25,2''$) равнялась лишь $01' 15,3''$, а разность между наибольшим и наименьшим из максимальных южных склонений ($23^\circ 27' 22,1''$ и $23^\circ 26' 25,0''$) не составляла даже одной минуты ($00' 57,1''$).

Приведенные числа показывают, что как видимый горизонтальный полудиаметр, так и склонение Солнца варьируют в значительных пределах в течение года, но почти не изменяются из года в год. Благодаря отсутствию многолетних изменений названных параметров представилось возможным вычислить их средние значения, а затем и амплитуды F_n° , F_c° и F_A° на каждую календарную дату. Результаты вычислений, графически представленные на рис. I, позволили установить наиболее существенные особенности изменения этих амплитуд в течение года. Амплитуда F_n° достигает максимальных значений, соответственно равных $3,85 \cdot 10^{-5}$ и $3,77 \cdot 10^{-5}$ дин, 12-14 марта и 2-3 сентября, а минимальных ($3,04 \cdot 10^{-5}$ и $3,35 \cdot 10^{-5}$ дин) - 23-24 июня и 20-23 декабря. Отношение между ее минимальным и максимальным значениями равно 1:1,27. Амплитуда F_c° претерпевает гораздо более резкие изменения. Дважды в течение года в дни весеннего и осеннего равноденствия (21 марта и 23 сентября) ее величина обращается в ноль и дважды (20-22 июня и 22-24 декабря) достигает максимальных значений, равных соответственно $2,64 \cdot 10^{-5}$ и $2,91 \cdot 10^{-5}$ дин. Амплитуда F_A° в течение года также имеет два максимума (17-20 марта и 27 сентября) и два минимума (22-23 июня и 22-23 декабря). Максимальные ее значения соответственно равны $3,84 \cdot 10^{-5}$ и $3,78 \cdot 10^{-5}$ дин, а минимальные - $1,90 \cdot 10^{-5}$ и $2,09 \cdot 10^{-5}$ дин. Минимальное значение относится к максимальному, как 1:2,03.

Общей чертой изменения во времени амплитуд F_n° , F_c° и F_A° является то, что каждая из них в течение года имеет два максимума и два минимума. Однако наряду с этим в годовом ходе этих амплитуд существуют серьезные различия. Амплитуда F_n° изменяется в сравнительно небольших пределах, тогда как изменения амплитуд F_A° и особенно F_c° очень велики. Далее, амплитуда F_n° почти во все дни значительно больше, чем амплитуда F_A° и особенно F_c° . Это обстоятельство является важнейшей причиной преобладания в океанах солнечных приливов полусуточного периода над солнечными приливами суточного периода. Наконец, изменение во времени, с одной стороны, амплитуд F_n° и F_A° , а с другой, - амплитуды F_c° происходит с разностью фаз, равной приблизительно четверти года.

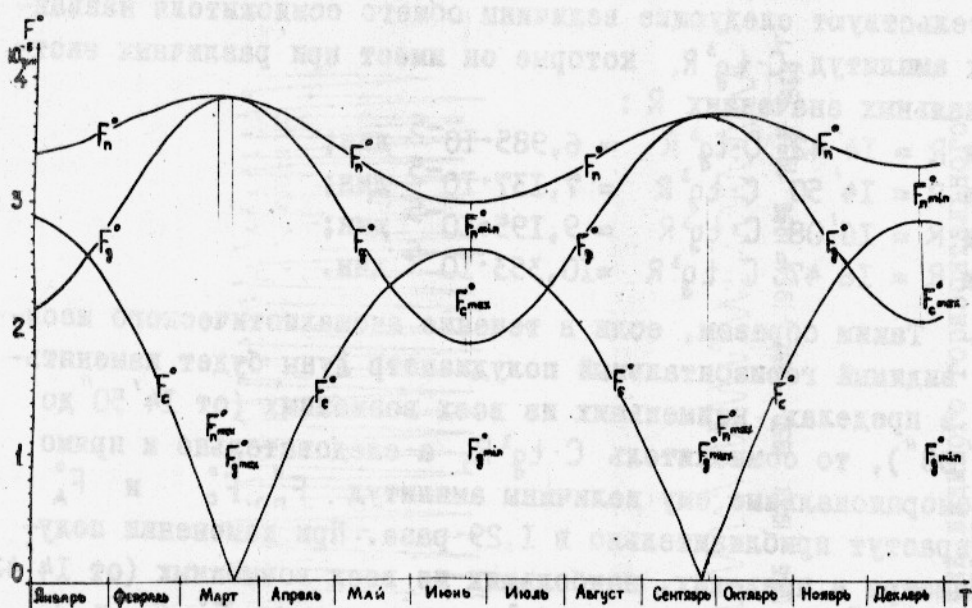


Рис. I. Изменение амплитуд F_n^0 , F_c^0 и F_A^0 в течение года

Годовой ход амплитуд F_n^0 , F_c^0 и F_A^0 вызывает внутри-годовое изменение амплитуд приливных движений полусуточного, суточного и долгого периодов. Однако, поскольку амплитуды F_n^0 , F_c^0 и F_A^0 не изменяются из года в год, многолетних изменений солнечных приливов любого периода не существует.

Совершенно по другому изменяются во времени приливы всех периодов, вызванные действием Луны, что объясняется иными особенностями изменений видимого горизонтального полудиаметра и склонения этого светила. Анализ хода видимого горизонтального полудиаметра Луны в течение 482 аномалистических месяцев (1922-1960 гг.) показал, что минимальные его величины в это время варьировали в пределах от $14' 42''$ до $14' 50''$, а максимальные - от $16' 08''$ до $16' 47''$. Ход максимальных и минимальных величин этого параметра графически показан на рис. 2. Нетрудно заметить, что в течение каждого года экстремальные значения видимого горизонтального полудиаметра Луны неоднократно были близки к их верхним и нижним пределам, но почти не изменялись из года в год. Внутригодовые изменения экстремальных значений этого параметра резко сказыв-

вадись на величинах амплитуд F_n° , F_c° и F_A° . Об этом свидетельствуют следующие величины общего множителя названных амплитуд $C \cdot \operatorname{tg}^3 R$, которые он имеет при различных экстремальных значениях R :

$$\text{при } R = 14' 42'' \quad C \cdot \operatorname{tg}^3 R = 6,985 \cdot 10^{-5} \text{ дин;}$$

$$\text{при } R = 14' 50'' \quad C \cdot \operatorname{tg}^3 R = 7,137 \cdot 10^{-5} \text{ дин;}$$

$$\text{при } R = 16' 08'' \quad C \cdot \operatorname{tg}^3 R = 9,195 \cdot 10^{-5} \text{ дин;}$$

$$\text{при } R = 16' 47'' \quad C \cdot \operatorname{tg}^3 R = 10,353 \cdot 10^{-5} \text{ дин.}$$

Таким образом, если в течение аномалистического месяца видимый горизонтальный полудиаметр Луны будет изменяться в пределах, наименьших из всех возможных (от $14' 50''$ до $16' 08''$), то множитель $C \cdot \operatorname{tg}^3 R$, а следовательно и прямо пропорциональные ему величины амплитуд F_n° , F_c° и F_A° возрастут приблизительно в 1,29 раза. При изменении полу- диаметра в пределах, наибольших из всех возможных (от $14' 42''$ до $16' 47''$), множитель $C \cdot \operatorname{tg}^3 R$ и амплитуды F_n° , F_c° и F_A° увеличатся примерно в 1,48 раза. Однако ход параметра R не влияет на многолетнюю периодическую изменчивость приливов.

Ход склонения Луны вызывает не только внутригодовые, но и многолетние изменения приливов. В течение каждого тропического месяца склонение Луны последовательно увеличивается от нуля до максимальной положительной величины, затем уменьшается до нуля, после чего достигает максимальной отрицательной величины и, наконец, вновь принимает нулевое значение. Максимальные величины положительного и отрицательного (северного и южного) склонений изменяются во времени в пределах от $18^\circ 18'$ до $28^\circ 36'$ с периодом, равным приблизительно 18,5 года. Это изменение, вызванное обращением узлов лунной орбиты, наклоненной к плоскости эклиптики на $5^\circ 09'$, называют Саросским циклом. Ход величин максимальных северных и южных склонений Луны на протяжении двух Саросских циклов графически изображен на рис.3.

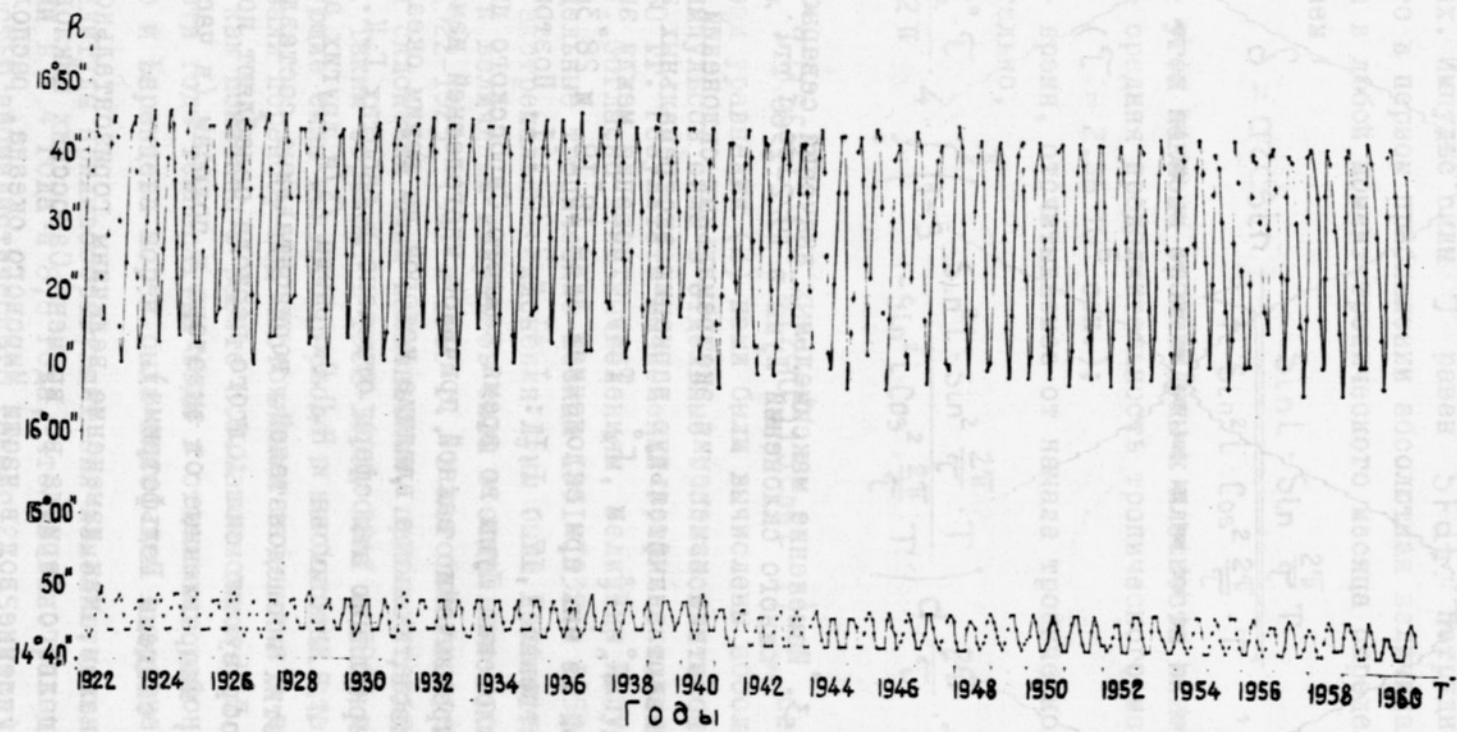


Рис.2. Изменение максимальных и минимальных величин видимого горизонтального
 полудиаметра Луны в 1922-1960 гг.

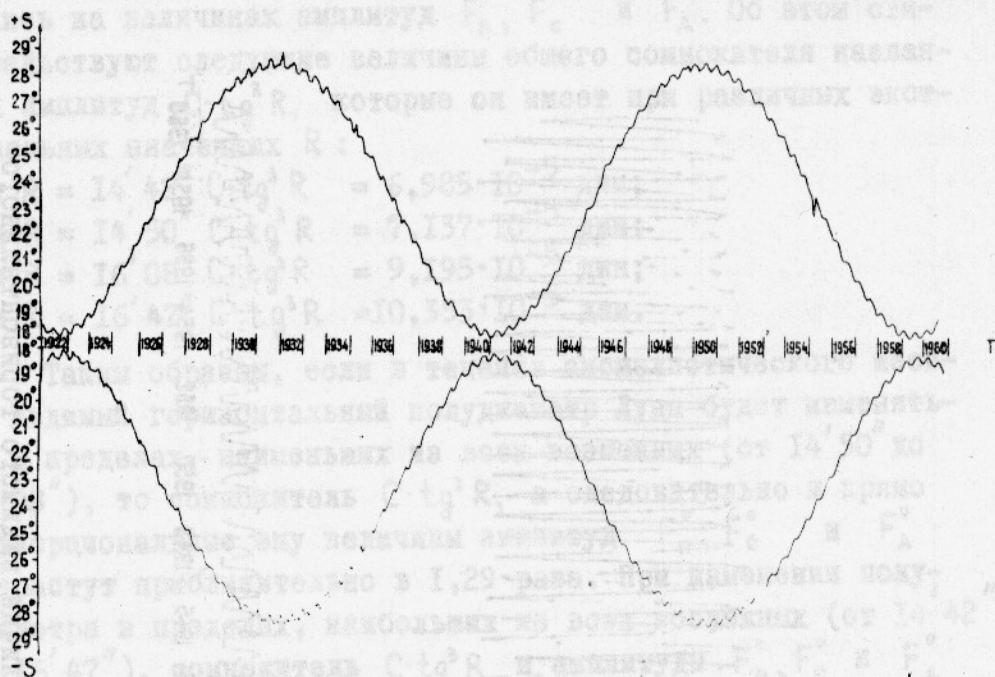


Рис.3. Изменение максимальных значений северного и южного склонений Луны в 1922-1960 гг.

Многолетние изменения экстремальных склонений Луны обуславливают значительную вариацию экстремальных значений амплитуд F_n° , F_c° и F_d° . Так, отношения между значениями каждой из них при склонениях Луны $18^\circ 18'$ и $28^\circ 36'$ равны соответственно $1,17 : 1,1 : 1,41$ и $2,25 : 1$. Поэтому изменение склонения Луны во время каждого Саросского цикла является чрезвычайно важной причиной многолетней изменчивости приливов, большое влияние которой на режим океанов и даже на циркуляцию атмосферы отмечено в работах Г.К.Ижевского [1], И.В.Максимова и Н.П.Смирнова [3] и других авторов. По мнению этих исследователей, горизонтальные составляющие приливообразующих сил долгого периода ослабляют постоянные течения, направленные от экватора к полюсам (в частности, течения системы Гольфстрима).

Покажем, как изменение величины горизонтальной составляющей долгого периода во времена Саросских циклов влияет на поступление вод в части Мирового океана, расположенные на высоких широтах. Количество вод, переносимых течениями

долгого периода в отдельные тропические месяцы, пропорционально импульсу силы, действующей на воду в течение каждого из них. Импульс силы J равен $SFdt$. Нетрудно показать, что в первом приближении абсолютная величина склонения Луны в любой момент тропического месяца определяется уравнением

$$\delta = \alpha \tau \sin \frac{\sin i \cdot \sin \frac{2\pi}{\tau} T}{\sqrt{1 - \sin^2 i \cdot \cos^2 \frac{2\pi}{\tau} T}},$$

где i - угол наклона орбиты Луны к плоскости экватора;

τ - средняя продолжительность тропического месяца ($\tau = 2,36 \cdot 10^6$ сек.);

T - время, отсчитываемое от начала тропического месяца.

Следовательно,

$$J = \frac{F_A \cdot \tau}{2\pi} \cdot 4 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(1 - 3 \frac{\sin^2 i \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{\tau} T}{1 - \sin^2 i \cos^2 \frac{2\pi}{\tau} T} \right) d \frac{2\pi}{\tau} T =$$

$$= 2 \cdot F_A \cdot \tau (1,5 \cos i - 1) = -4,72 \cdot 10^6 (1,5 \cos i - 1) \cdot F_A \text{ сек.} \quad (2)$$

При помощи уравнения (2) нами были вычислены абсолютные величины импульсов силы в отдельные тропические месяцы в 1922-1960 гг. Результаты вычислений графически изображены на рис. 4. Согласно этим вычислениям, величины импульсов силы в отдельные тропические месяцы 1931-1932 и 1950 г., в которые экстремальные склонения Луны были наибольшими, относятся к величинам импульсов силы в отдельные тропические месяцы 1922-1923, 1941 и 1960 г., в которые экстремальные значения склонений были наименьшими, приблизительно как 1 : 1,3. Таким образом, в 1922-1923, 1941 и 1960 г. приливообразующие силы долгого периода в наибольшей степени препятствовали переносу вод постоянными течениями в высокие широты. Как показано в работе Н.В.Максимова и Н.П.Смирнова [3], в эти годы температура воды в отдельных районах Норвежского и Баренцева морей была ниже, чем в другие годы.

Амплитуды приливообразующих сил изменяются также с периодами в 4,4 года и 8,8 года, что вызвано разной продолжительностью аномалистического (около 27,55 суток) и тропического (около 27,32 суток) месяцев. Средняя величина

этой разности равна 0,23 суток. Кроме того, вследствие сложности орбиты Луны амплитуды приливообразующих сил, вызванных действием этого светила, подвергаются непериодическим изменениям.

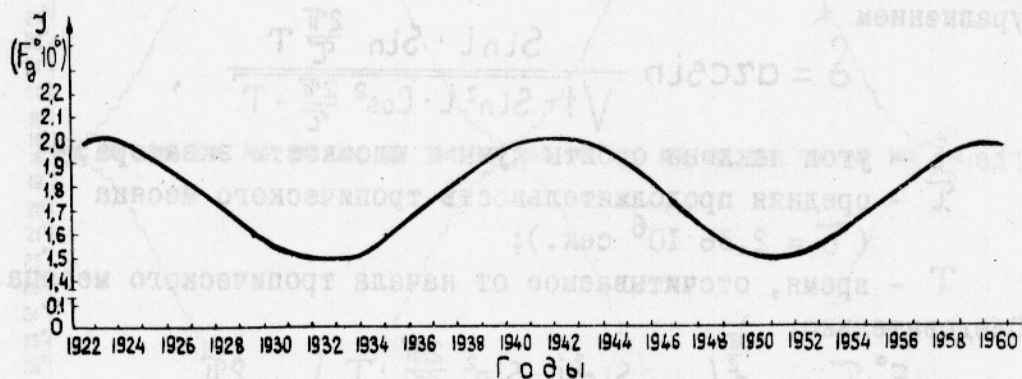


Рис. 4. Изменение месячных импульсов горизонтальной составляющей приливообразующей силы долгого периода в 1922-1960 гг.

Представляется, что из трех рассматриваемых сил наибольшее влияние на стабильные изменения океанографических условий оказывает долгопериодная, поскольку действие ее в значительной степени определяет интенсивность водообмена между высокими и низкими широтами. Очевидно, степень влияния долгопериодной силы Луны на этот водообмен в течение какого-либо отрезка времени определяется не экстремальным значением силы, а величиной ее импульса за это время. Количественную зависимость между некоторыми характеристиками океанографического режима (температура воды, соленость и т.д.) и приливообразующей силой долгого периода целесообразно искать путем установления корреляционных связей между импульсами сил и аномалиями этих характеристик в течение каких-либо отрезков времени (например, календарных месяцев).

Величины импульсов долгопериодной силы Луны можно вычислять следующим образом. Импульс силы в течение суток приблизительно равен среднему арифметическому из значений силы в начале и в конце суток, умноженному на число секунд в сутках. Импульс силы в течение календарного месяца (или какого-либо другого отрезка времени) равен сумме импульсов, вычис-

ленных для каждых суток этого месяца.

Для определения значений рассматриваемой силы удобно пользоваться таблицей, в которой приведены значения коэффициентов $K = \frac{1}{2} (1 - 3 \sin^2 \delta) \cdot 100$.

Т А Б Л И Ц А

для определения коэффициентов приливообразующей силы долгого периода по величинам склонений светил

Склонение светила	Коэффициент	Склонение светила	Коэффициент
00° 00' - 03° 19'	50	20° 34' - 21° 08'	31
03° 19' - 05° 44'	49	21° 08' - 21° 41'	30
05° 44' - 07° 25'	48	21° 41' - 22° 14'	29
07° 25' - 08° 47'	47	22° 14' - 22° 47'	28
08° 47' - 09° 58'	46	22° 47' - 23° 19'	27
09° 58' - 11° 02'	45	23° 19' - 23° 50'	26
11° 02' - 12° 01'	44	23° 50' - 24° 21'	25
12° 01' - 12° 55'	43	24° 21' - 24° 51'	24
12° 55' - 13° 46'	42	24° 51' - 25° 21'	23
13° 46' - 14° 35'	41	25° 21' - 25° 50'	22
14° 35' - 15° 21'	40	25° 50' - 25° 19'	21
15° 21' - 16° 05'	39	26° 19' - 26° 48'	20
16° 05' - 16° 47'	38	26° 48' - 27° 16'	19
16° 47' - 17° 28'	37	27° 16' - 27° 44'	18
17° 28' - 18° 07'	36	27° 44' - 28° 12'	17
18° 07' - 18° 45'	35	28° 12' - 28° 40'	16
18° 45' - 19° 22'	34	28° 40' - 29° 07'	15
19° 22' - 19° 59'	33	29° 07' - 29° 34'	14
19° 59' - 20° 34'	32	29° 34' - 30° 00'	13

Абсолютная величина искомой силы находится по значениям коэффициента K и видимого горизонтального полудиаметра Луны R при помощи соответствующих таблиц [2]. Предлагаемый способ позволяет находить величины долгопериодных сил Луны и их импульсов без громоздких вычислений. Известно, что астрономические параметры δ и R , являющиеся аргументами рассматриваемой силы, могут быть предвычислены с довольно

высокой точностью на большой срок вперед. Поэтому установление количественных связей между импульсами этой силы и значениями океанографических характеристик имеет большое значение для долгосрочного прогнозирования океанографических условий.

Л и т е р а т у р а

1. Ижевский Г.К. Океанографические основы формирования промышленной продуктивности морей. - М., Пищепромиздат, 1961, 215 с.
2. Исследование приливных явлений в неоднородном море. Л., Гидрометеоздат, 1965, 140 с.
3. Максимов Н.В., Смирнов Н.П. Многолетний околополюсный прилив и его значение для циркуляции океана и атмосферы Земли. "Океанология", т.7, вып.2, 1967, с.225 - 231.

THE EFFECT OF LONG-TERM TIDE-MAKING FORCES ON THE OCEANOGRAPHIC CONDITIONS

V.B.Rzhonsnitsky, N.V.Mikhailova

S U M M A R Y

The study of regularities of fluctuations in the ranges of solar and lunar tide-making forces has shown that the solar forces range within broader limits throughout a year, but they do not alterate from year to year. The lunar forces are, on the contrary, characterized by both short-term (half a nonth-month) and long-term (half a year - one year and a half) periods of fluctuations which affect the oceanographic regime of water bodies. The method suggested to ascertain quantitative relations between the lunar long-term force values and changes in the oceanographic characteristics is practically important to forecast oceanographic conditions.