

П. В. ПАВЛИВ, Н. А. МЕЛЬНИЧУК

О СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ЛУННО-СОЛНЕЧНЫХ ПРИЛИВОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОТОЧНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

Благодаря совершенствованию измерительных приборов и методов наблюдений, а также способов закладки реперов точность нивелирных измерений значительно возросла, и величины лунно-солнечных влияний лежат в пределах точности прецизионного нивелирования, о чем неоднократно указывалось в работах по исследованиям в этой области [3, 5—7].

В 1979 г. Международная геодезическая ассоциация на заседаниях в Канберре приняла решение о полном исключении приливных влияний из всех геодезических измерений.

В настоящее время известны различные пути исключения приливных влияний. М. И. Юркина [7], например, предлагает выделить во влияниях Луны и Солнца на Землю и ее гравитационное поле постоянные члены, зависящие от широты места и не зависящие от времени, и на их основе вычислять поправки в результаты нивелирования. Изменяющаяся во времени часть приливного влияния не учитывается, исходя из предположения о ее случайном влиянии и незначительной величине. Возможно, при решении некоторых задач теории фигуры Земли такой подход и оправдан. При решении же других народнохозяйственных задач, например, строительство уникальных сооружений, монтаж сложного технологического оборудования, нивелирование геодинамических полигонов, которые ставят всевозрастающие требования к точности результатов нивелирования, более целесообразным, на наш взгляд, будет полный учет приливных влияний.

Действующее руководство по нивелированию рекомендует использовать в данном случае следующее выражение [4]:

$$\Delta h = k \cdot \sin 2z \cdot \cos (A^* - A) \cdot s, \quad (1)$$

где k — численный коэффициент; z — зенитное расстояние светила; A, A^* — азимуты соответственно линии нивелирования и светила. Но применение этого способа влечет за собой неудобства, связанные с использованием в ходе вычислений таблиц Астрономического ежегодника, и приводит к большим непроизводительным затратам труда.

В связи с этим разработаны ряд номограмм и графиков [3, 5, 6, 9], которые в определенной мере облегчают вычисление поправок. При этом здесь прослеживается закономерность: чем больше упрощен процесс получения поправки, тем ниже по точности конечный результат. Поэтому зачастую они не отвечают требованиям практики.

В работе А. Франке [8] сделано сообщение о разработанной в ГДР программе на языке *PL/1* для вычисления приливных поправок. Программа создана для работы с уже имеющимися банками геодезических данных. Необходимые астрономические величины заносятся в память машины с астрономического или навигационного ежегодника. Последнее, на наш взгляд, является существенным недостатком программы.

С учетом вышеизложенного мы разработали способ вычисления приливных поправок с помощью ЭВМ и составили программу на языке Фортран.

В основу положены такие принципы:

использование минимального количества исходных данных;
получение необходимых астрономических величин в процессе вычисления поправок.

Для составления программы применен следующий математический аппарат.

В качестве исходного принято выражение, полученное из (1) и являющееся функцией экваториальных координат [9]:

$$\Delta h = k_{\odot} (f_1 \odot \Delta x + f_2 \odot \Delta y), \quad (2)$$

где

$$f_{1\odot} = -\sin 2\varphi \cos^2 \delta_{\odot} \cos^2 t_{\odot} + \cos 2\varphi \times \\ \times \sin 2\delta_{\odot} \cos t_{\odot} + \sin 2\varphi \sin^2 \delta_{\odot};$$

$$f_{2\odot} = -\sin \varphi \sin 2\delta_{\odot} \sin t_{\odot} - \cos \varphi \cos^2 \delta_{\odot} \sin 2t_{\odot};$$

$$\Delta x = s \cos A; \quad \Delta y = s \sin A;$$

φ — широта; s — длина линии нивелирования; $\delta_{\odot}$, $t_{\odot}$ — экваториальные координаты светил.

Часовой угол Солнца с достаточной точностью можно получить из выражения

$$t_{\odot} = T_{\text{ср}} - (n + i)^h + \lambda_E + E, \quad (3)$$

где λ_E — долгота (восточная); n — номер часового пояса; i — поправка к поясному времени для перехода к декретному; $T_{\text{ср}}$ — среднее время нивелирования линии; E — уравнение времени + 12^h.

Последнее находим из формулы [1]:

$$E = 592^s \sin 2(\Gamma + g) - 460^s \sin g + 12^h, \quad (4)$$

где средняя аномалия истинного Солнца

$$g = 358,4758^\circ + 129\,596\,850'' ((d + M)/36525); \quad (5)$$

средняя тропическая долгота перигея солнечной орбиты

$$\Gamma = 281,2208^\circ + 6190'' ((d + M)/36525). \quad (6)$$

Параметр d разложений (5) и (6) означает промежуток времени от фундаментальной эпохи IED 2415020,0 до рассматриваемого момента, выраженный в эфемеридных сутках. Всемирное время —

$$M = T_{\text{ср}} - (n + i)^h. \quad (7)$$

Для определения d воспользуемся формулой Ю. И. Сафронова

$$d = 365n + \left[\frac{n-1}{4} \right] + 28(m-1) + \sum_i^{m-1} \Delta m_i + q + (\lambda - 0,5), \quad (8)$$

где n , m , q означают номер года (отсчитываемый от 1900 г.), месяц и дату; Δm_i — дополнения от 28 сут. до полного месяца. Квадратные скобки означают целую часть результата деления.

Склонение Солнца вычисляем из соотношения

$$\text{tg } \delta_{\odot} = \sin \alpha_{\odot} \text{tg } \varepsilon, \quad (9)$$

где средний наклон эклиптики к экватору

$$\varepsilon = 23,4523^\circ - 3,563^\circ \cdot 10^{-6}(d + M); \quad (10)$$

прямое восхождение Солнца

$$\alpha_{\odot} = 18,6461^h + 0,006\,570\,9822^h (d + M). \quad (11)$$

Часовой угол Луны описываем формулой

$$t_{\odot} = s - \alpha_{\odot}, \quad (12)$$

где α_{ζ} — прямое восхождение Луны, а местное звездное время s на меридиане с долготой λ_E определяется выражением

$$s = S_0 + M + \mu M + \lambda_E, \quad (13)$$

в котором

$$S_0 = 18,6461^h + 0,006\,570\,9822^h d; \quad (14)$$

M — всемирное время; $\mu = 0,0027379093$.

Из эклиптических координат Луны, определяемых разложениями [1]

$$\begin{aligned} \lambda_{\zeta} = & L + 6,289^{\circ} \sin l - 1,274^{\circ} \sin (l - 2D) + 0,658^{\circ} \sin 2D + \\ & + 0,214^{\circ} \sin 2l - 0,186^{\circ} \sin l' - 0,114^{\circ} \sin 2F - 0,059^{\circ} \sin (2l - 2D) - \\ & - 0,057^{\circ} \sin (l + l' - 2D) + 0,053^{\circ} \sin (l + 2D) - 0,046^{\circ} \sin (l' - 2D) + \\ & + 0,041^{\circ} \sin (l - l') - 0,035^{\circ} \sin D - 0,030^{\circ} \sin (l + l'), \quad (15) \\ \beta_{\zeta} = & 5,128^{\circ} \sin F + 0,281^{\circ} \sin (l + F) - 0,278^{\circ} \sin (F - l) - \\ & - 0,173^{\circ} \sin (F - 2D) + 0,055^{\circ} \sin (F + 2D - l) - \\ & - 0,046^{\circ} \sin (l + F - 2D) + 0,033^{\circ} \sin (F + 2D), \end{aligned}$$

в которых

$$\begin{aligned} D = & 350,7375^{\circ} + 12,19074912^{\circ} (d + M); \\ F = & 11,2509^{\circ} + 13,22935044^{\circ} (d + M); \\ L = & 270,4342^{\circ} + 13,17639652^{\circ} (d + M); \\ l = & 296,1046^{\circ} + 13,06499244^{\circ} (d + M); \\ l' = & 358,4758^{\circ} + 0,985600267^{\circ} (d + M), \end{aligned} \quad (16)$$

можно получить экваториальные координаты, используя формулы связи

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \cos \varepsilon \sin \beta + \sin \varepsilon \cos \beta \sin \lambda, \\ \cos \delta \cos \alpha &= \cos \beta \cos \lambda, \\ \cos \delta \sin \alpha &= -\sin \beta \sin \varepsilon + \cos \beta \cos \varepsilon \sin \lambda. \end{aligned} \quad (17)$$

С применением составленной программы выполнен анализ характера и степени влияния приливных сил на результаты высокоточного нивелирования.

С этой целью, например, вычислена приливная поправка в превышение, полученное при нивелировании условной линии длиной 28 км, расположенной на широте 50° и с азимутом 0° . При этом предполагалось, что нивелирные работы выполнялись в первую неделю мая 1983 г. и в полном соответствии с инструкцией, т. е. по схеме «восьмерка» с симметричностью наблюдений прямого и обратного хода в утренние и вечерние часы. Поправка в среднее превышение из прямого и обратного ходов составила 1,04 мм, а это 0,037 мм на 1 км двойного хода, что составляет более 70% максимально допустимого действующей инструкцией значения си-

стематической ошибки. Следовательно, ограничения, с помощью которых предполагается исключить или свести к минимуму влияние приливных сил Луны и Солнца, не приводят к желаемому результату.

В то же время каждое дополнительное условие инструкции накладывает свои ограничения на ход выполнения нивелирных работ, что в конечном счете сказывается и на производительности труда.

Среднемесячные значения приливных поправок (в мм на 1 км хода) в течение года на разных широтах для линии с азимутом 0°

Месяц	Поправка, мм/км			
	на широте 30°	на широте 40°	на широте 50°	на широте 60°
Январь	-0,028	-0,033	-0,034	-0,027
Февраль	-0,032	-0,037	-0,038	-0,030
Март	-0,035	-0,040	-0,041	-0,031
Апрель	-0,035	-0,039	-0,039	-0,031
Май	-0,031	-0,035	-0,035	-0,027
Июнь	-0,029	-0,032	-0,032	-0,024
Июль	-0,031	-0,034	-0,033	-0,025
Август	-0,034	-0,038	-0,038	-0,028
Октябрь	-0,033	-0,037	-0,037	-0,029
Ноябрь	-0,030	-0,035	-0,035	-0,028
Декабрь	-0,029	-0,033	-0,034	-0,027

Для получения более общей картины рассчитаны возможные приливные поправки в превышении, которое получено при нивелировании линии длиной 1 км в направлении с юга на север в течение часа. Такие поправки вычислены для каждого часа суток и на их основе выведены среднесуточные и среднемесячные значения в течение года (1984). Для выяснения степени влияния широты на значение поправки вычисления сделаны для разных широт. По результатам, приведенным в таблице, видно, что между силой приливного влияния и временем года существует определенная зависимость. Изменение среднемесячных приливных влияний в течение года достигает 0,01 мм/км. На такое же значение может изменяться на территории нашей страны приливная поправка в зависимости от широты. Следовательно, влияние таких двух факторов, как широта и время, на силу приливов почти однозначно, что несколько не согласовывается с предположением М. И. Юркиной.

Особенно большое значение имеет исключение приливных влияний из результатов нивелирования геодинимических полигинов, используемых для решения различных народнохозяйственных задач, в т. ч. для сейсмического районирования территории страны. В этом случае даже такие, на первый взгляд, незначительные погрешности могут исказить конечные результаты решаемых задач. Но на практике используются также результаты нивелировок, при которых нельзя вычислить точные значения приливных поправок

из-за отсутствия точных данных о времени наблюдений. В данной ситуации можно использовать среднемесячные значения приливных влияний.

Таким образом, влияние сил Луны и Солнца на результаты высокоточного нивелирования имеет систематический характер. Его значение достигает 0,04 мм/км. Вычисление приливных поправок с помощью ЭВМ по предлагаемой методике дает возможность избавиться от непроизводительных затрат труда. А это, в свою очередь, позволит отказаться от некоторых требований инструкции и тем самым расширить временные рамки выполнения нивелирных работ.

1. Абалакин В. К. Основы эфемеридной астрономии. М., 1979.
2. Астрономический ежегодник СССР на 1984 год. М., 1981.
3. Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П. Об учете приливных поправок при изучении современных вертикальных движений земной поверхности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1968. Вып. 3. С. 90—97.
4. Нивелирование I и II классов. Практическое руководство. М., 1982.
5. Урманцев Ф. М. Графики поправок в нивелирные превышения за лунно-солнечное притяжение // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1972. Вып. 2. С. 60—68.
6. Урманцев Ф. М. О приближенном вычислении лунно-солнечной поправки в результаты нивелирования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1970. Вып. 3. С. 95—98.
7. Юркина М. И. О приливных поправках в геодезии // Veröffentlichungen des Zentrallnstituts für Physik der Erde. 1985. Nr. 81. Teil II. S. 156—159.
8. Franke A. Die Berechnung der Lunisolarkorrektur mit Hilfe eines PL/1 — Programms // Vermessungstechnik. 1977. N 1. S. 23—24.
9. Steinberg I. Verbesserung der Nivellementergebnisse hoher Genauigkeit durch Anbringen einer Gezeitkorrektion // Vermessungstechnik. 1966. N 3. S. 104—109.