

УДК 528.389

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОПРАВОК ЗА ЛУННО-СОЛНЕЧНЫЙ ПРИЛИВ В РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕЦИЗИОННОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

Вячеслав Георгиевич Колмогоров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры геоматики и инфраструктуры недвижимости, тел. (913)941-78-90, e-mail: kolmina@mail.ru

Виктор Анатольевич Калюзин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой геоматики и инфраструктуры недвижимости, тел. (952)907-19-83, e-mail: kaluzhin@mail.ru

Анастасия Николаевна Сачкова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)469-15-50, e-mail: kaza4ka_92@mail.ru

Одной из наиболее важных задач при изучении современных геодинамических процессов геодезическими и геофизическими методами является повышение точности инструментальных измерений путем как разработки методики наблюдений, так и учета различных факторов, влияющих на точность определения изучаемых объектов. Одним из таких факторов являются лунно-солнечные приливы в земной коре: под действием центробежных и приливных сил, под давлением атмосферы и ветров упругая Земля деформируется.

Авторами статьи предложены формулы вычисления поправки, обусловленные влияниями Луны и Солнца, которые весьма трудоемки. Для ускорения и облегчения процесса рассчитаны специальные номограммы широт 45° , 50° , 55° и 60° . При построении номограмм по часовому углу t давались значения от 0 до 180° и от 180 до 360° через 5° , а склонениям δ – от -30° до $+30^\circ$ через 5° . По номограммам выбирались составляющие отклонения отвеса и умножались на соответствующие компоненты нивелирной линии, которые можно определить по топографической карте масштаба $1 : 25\ 000$. Таким образом, в статье предложен метод определения поправок за лунно-солнечный прилив в результаты прецизионного нивелирования с помощью специальных палеток.

Ключевые слова: уровенная поверхность, приливные силы, колебания отвесной линии, превышение, поправка, влияние Луны и Солнца, суммарная поправка, номограмма.

Одной из наиболее важных задач при изучении современных геодинамических процессов геодезическими и геофизическими методами является повышение точности инструментальных измерений путем как разработки методики наблюдений, так и учета различных факторов, влияющих на точность определения изучаемых объектов [1–3]. Одним из таких факторов являются лунно-солнечные приливы в земной коре: под действием центробежных и приливных сил, под давлением атмосферы и ветров упругая Земля деформируется. Современная точность в геодезии позволяет учитывать эффекты упругой деформации и согласовать ее параметры с фундаментальными геодезическими постоянными

Земли. Суммарное воздействие Луны и Солнца, приводящее к колебаниям уровня поверхности Земли, выражает формула

$$\varphi = \frac{H}{g} = \frac{1}{g} \frac{dV}{dS}, \quad (1)$$

где H – горизонтальная составляющая приливообразующей силы; g – сила тяжести; V – потенциал приливообразующей силы; S – направление линии нивелирования [4, 5],

$$H = \frac{3gr^2M\sin 2z}{2r^3E}, \quad (2)$$

где z – зенитное расстояние светила; M – масса светила; E – масса Земли; r – расстояние между центрами Земли и светила. Учитывая соотношение масс Земли, Луны и Солнца $M_{\text{л}} = E/81,5$, $M_{\text{с}} = 333\,400E$, при $r_{\text{л}} = 60,3\rho$ и $r_{\text{с}} = 23\,485\rho$, получим величины уклонения отвеса

$$\varphi_{\text{л}}'' = 0,016\,6\sin 2Z_{\text{л}}, \quad \varphi_{\text{с}}'' = 0,007\,8\sin 2Z_{\text{с}}. \quad (3)$$

При наклонномерных наблюдениях уклонения отвеса находятся из соотношения:

$$\psi'' = \frac{dV}{dS} \frac{(1+k-q)}{g}, \quad (4)$$

где q – отношение действительного смещения земной поверхности к теоретическому смещению; k – изменение потенциала. Безразмерные параметры k и q введены А. Лявом для описания механических свойств и деформации упругой Земли и называются «числами Лява». Из наклонномерных наблюдений за приливными деформациями земной коры известно, что

$$g = 1 + k - q = 0,70.$$

Поэтому уклонения отвеса, вызванные действием Луны и Солнца, соответственно равны:

$$\psi_{\text{л}}'' = 0,012\,0\sin 2Z_{\text{л}}, \quad \psi_{\text{с}}'' = 0,005\,5\sin 2Z_{\text{с}}. \quad (5)$$

Для любого другого направления будет

$$\psi_s'' = \varphi \cos(A_* - A_s), \quad (6)$$

где A_* – азимут светила; A_s – азимут направления S [2, 3].

Поправки в превышения этой линии равны

$$\psi_{\text{л}} = 0,058S \sin 2Z_{\text{л}} \cos(A_{\text{л}} - A_{\text{с}}), \quad \psi_{\text{с}} = 0,027S \sin 2Z_{\text{с}} \cos(A_{\text{с}} - A_{\text{с}}). \quad (7)$$

Суммарная поправка в нивелирование за сизигийный прилив (при полнолунии и новолунии) достигает 0,085 мм/км. Так как вычисление поправок по формуле (5) для длинных нивелирных линий и для нивелирной сети связано с большой затратой труда, J. Steinberg [6] предложил вычислять поправки по формулам:

$$k_N = -K(\sin 2\varphi \cos^2 \delta \cos^2 t) - \cos^2 \varphi \sin 2\delta \cos t - \sin 2\varphi \sin^2 \delta); \quad (8)$$

$$k_E = -K(\cos \varphi \cos^2 \delta \sin 2t + \sin \varphi \sin 2\delta \sin t),$$

где $K = 0,058$ или $0,027$; φ – широта места наблюдения; δ – склонение светила; t – часовой угол светила; k_N и k_E – северный и восточный компоненты уклонения отвеса. Общая поправка за прилив равна

$$\xi_{\text{общ}} = (K_{\text{л},N} + K_{\text{с},N})S_N + (K_{\text{л},E} + K_{\text{с},E})S_E, \quad (9)$$

где S_N и S_E – северная и восточная составляющие линии нивелирования. Поправки, обусловленные только влиянием Луны, для определенного места наблюдения имеют одинаковую величину на 1 км хода в северном направлении, так как во время измерения длинных нивелирных линий все часовые углы и все склонения Луны появляются с одной частотой (Луна за 14 суток проходит все значения склонений в соответствующем районе). При такой предпосылке можно теоретически вычислить среднее значение поправки, обусловленной влиянием Луны для северного компонента нивелирной линии:

$$K_{\text{л},N} = [2n(\delta_2 - \delta_1)]^{-1} \int_{\delta_1}^{\delta_2} \int_0^{2n} -0,058(\sin 2\varphi \cos^2 \delta \cos^2 t - \cos 2\varphi \sin 2\varphi \cos t - \sin 2\varphi \sin \delta) dt d\delta. \quad (10)$$

Для вычисления теоретического среднего значения поправки, обусловленной влиянием Солнца, достаточно знать среднее время нивелирования всей линии. Эта поправка вычисляется по формуле:

$$K_{\text{с},N} = \frac{1}{2n(\delta_2 - \delta_1)} \int_{\delta_1}^{\delta_2} \int_0^{2n} -0,027(\cos \varphi \cos^2 \delta \sin 2t + \sin \varphi \sin 2\delta \sin t) dt d\delta. \quad (11)$$

Аналогичным образом рассчитываются поправки $k_{\text{л},E}$ и $k_{\text{с},E}$ для восточной составляющей нивелирной линии. На коротких линиях произвольного направления поправка уменьшает систематическую часть ошибки определения превышения, а на длинных – принимает случайный характер. Но при нивелировании линии только в северном или только в южном направлениях поправки принимают одинаковые знаки и при длинных линиях накапливаются как система-

тические ошибки. При двойном нивелировании противоположные знаки приливных поправок не уничтожаются, так как превышения имеют противоположные знаки. Поэтому при производстве прецизионного нивелирования приливные поправки следует вводить в каждый ход. Для ускорения и облегчения трудоемкого процесса вычисления приливных поправок авторами рассчитаны специальные номограммы (рис. 1–4) для широт 45, 50, 55 и 60° [7, 8]. При построении номограмм по часовому углу t давались значения от 0 до 180° и от 180 до 360° через 5°, а склонениям δ – от -30 до +30° через 5°. По номограммам выбираются составляющие уклонения отвеса и умножаются на соответствующие компоненты нивелирной линии, которые можно определить по топографической карте масштаба 1 : 25 000.

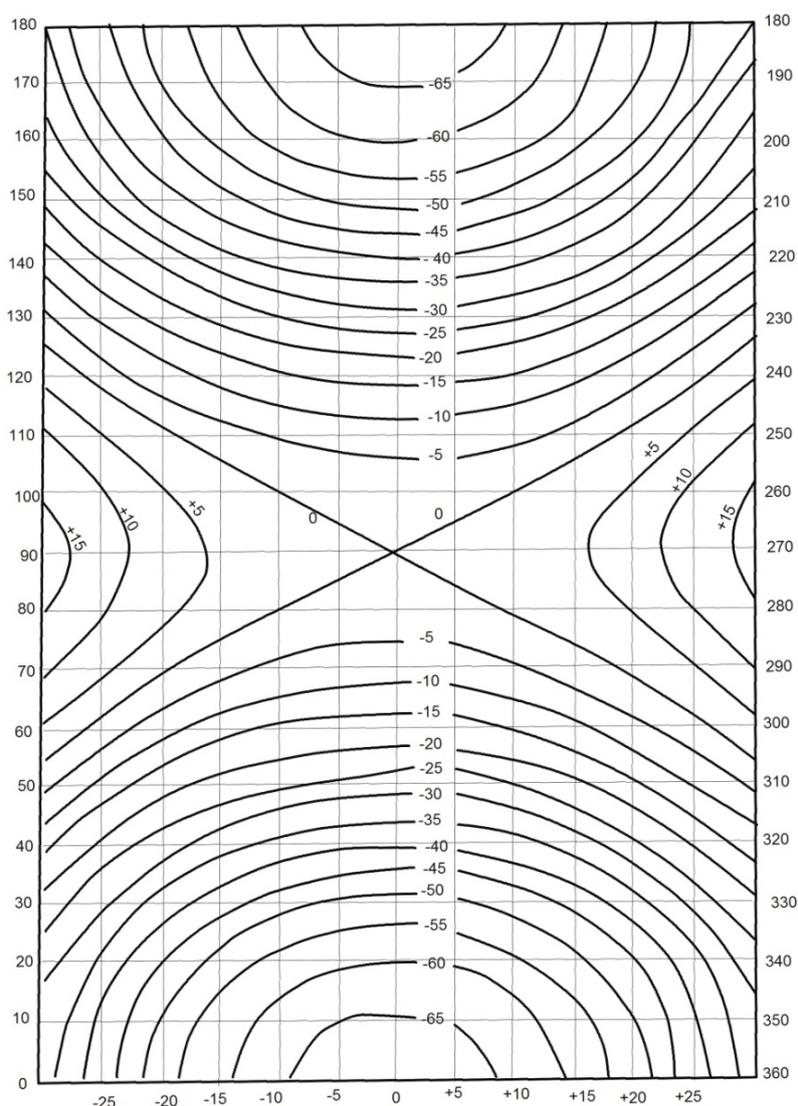


Рис. 1. Номограмма для вычисления среднего значения приливной поправки, обусловленной влиянием Луны на 1 км северной составляющей нивелирного хода $k_{л, N}$ на широте 45°

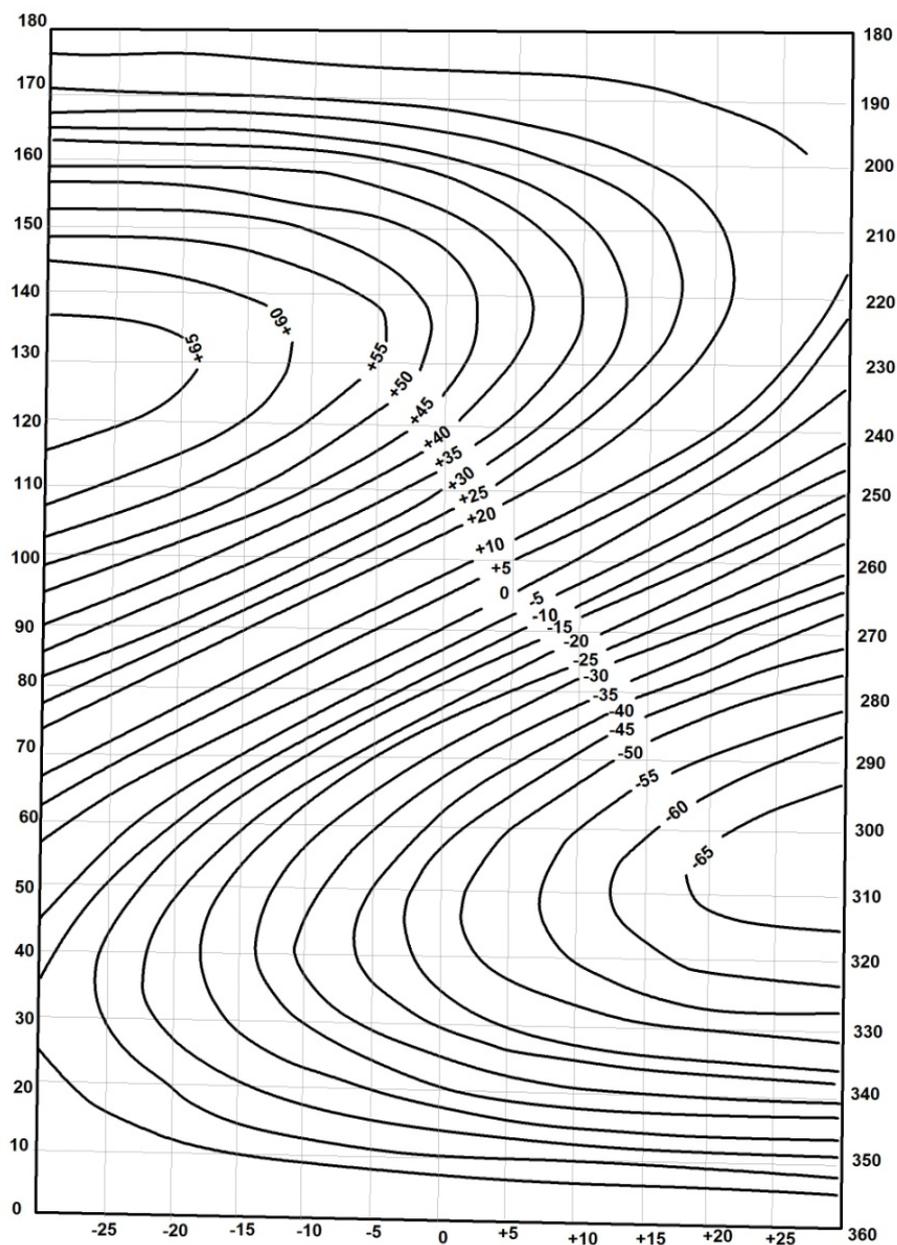


Рис. 2. Номограмма для вычисления среднего значения приливной поправки, обусловленной влиянием Луны на 1 км восточной составляющей нивелирного хода $k_{л, E}$ на широте 45°

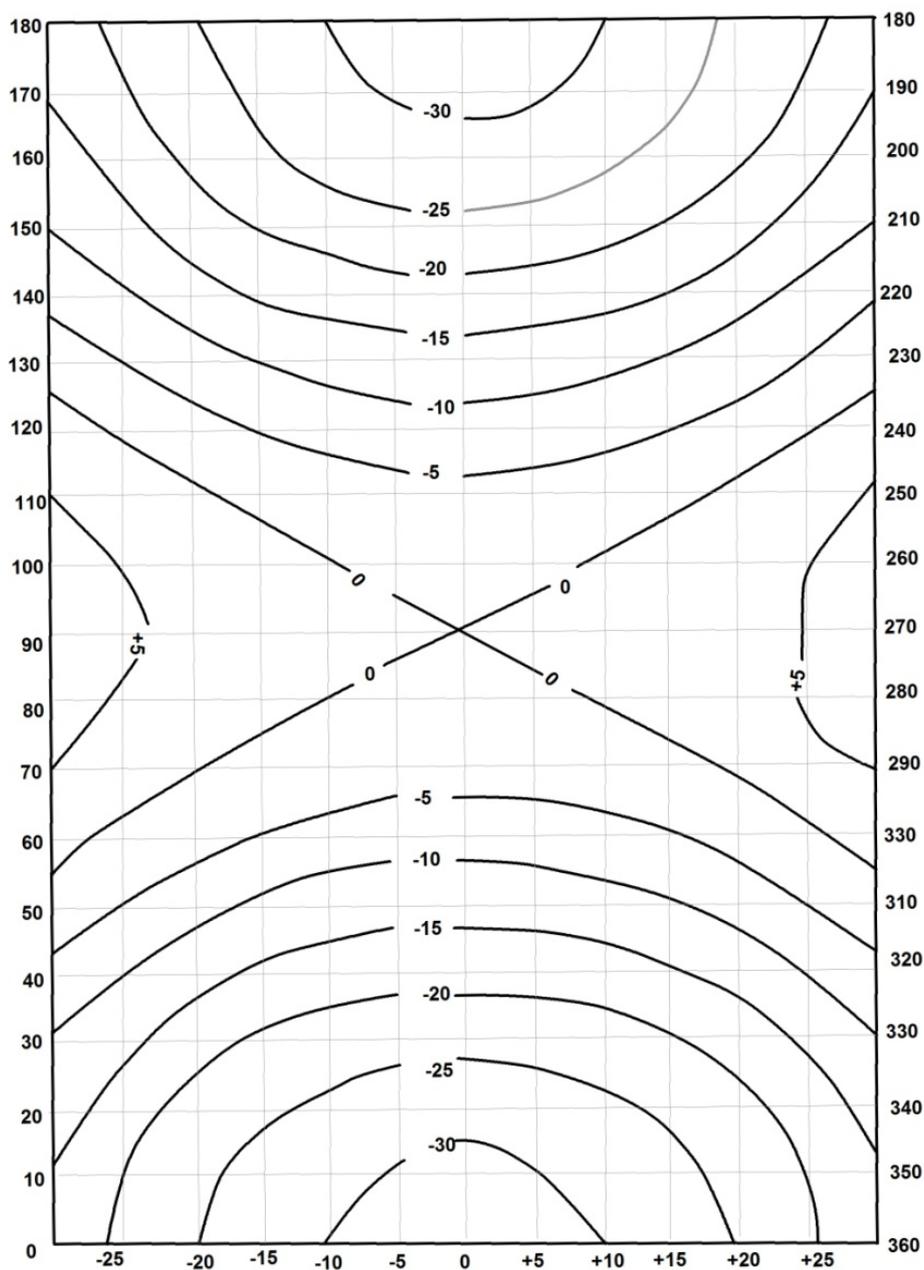


Рис. 3. Номограмма для вычисления среднего значения приливной поправки, обусловленной влиянием Солнца на 1 км северной составляющей нивелирного хода $k_{с, N}$ на широте 45°

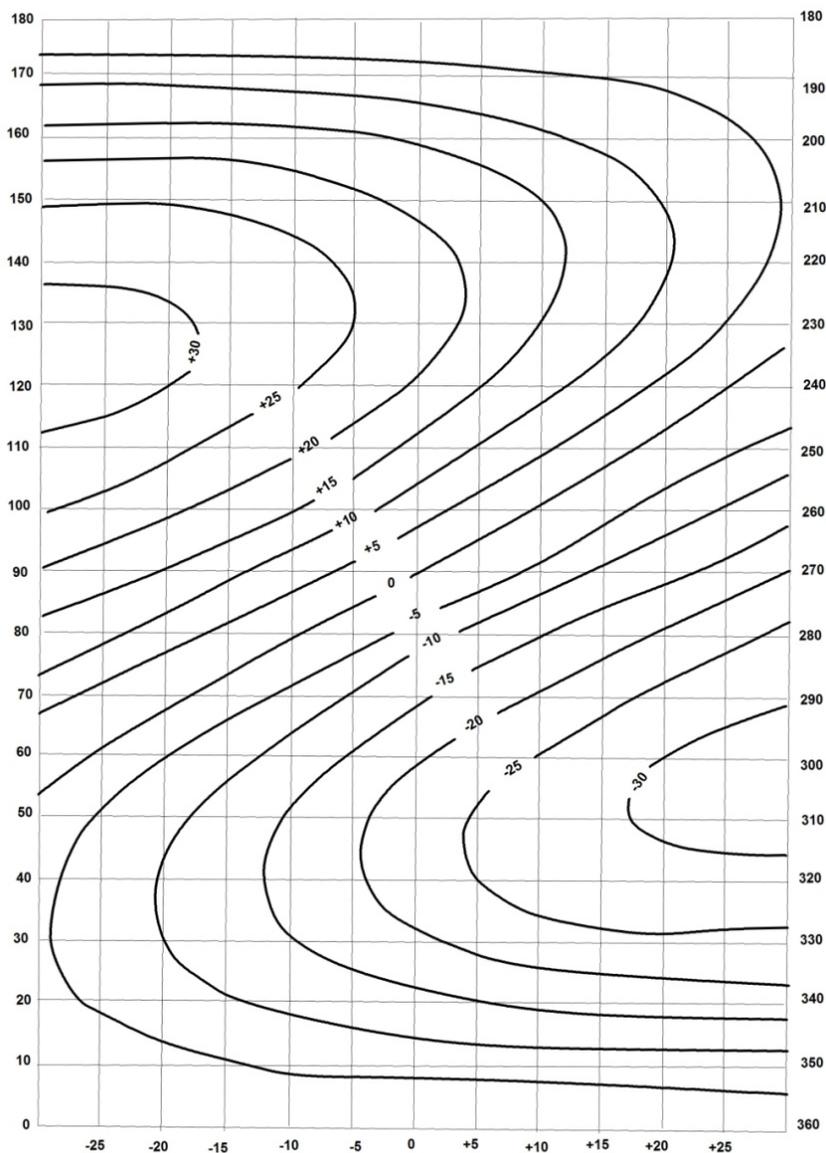


Рис. 4. Номограмма для вычисления среднего значения приливной поправки, обусловленной влиянием Солнца на 1 км восточной составляющей нивелирного хода $k_{c,E}$ на широте 45°

Таким образом, предложенный метод определения поправок за лунно-солнечный прилив в результате прецизионного нивелирования с помощью специальных палеток позволит повысить оперативность при их определении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колмогоров В. Г., Дударев В. И. Состояние проблемы комплексного изучения современной геодинамики Сибири в конце двадцатого столетия // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 4 (28). – С. 3–12.

2. Колмогоров В. Г. К вопросу о возможности изучения деформационного состояния земной поверхности по результатам повторного высокоточного нивелирования // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 9–14.
3. Колмогоров В. Г. Математическое описание параметров современных движений земной коры // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 1 (12). – С. 70–73.
4. Машимов М. М. Геодезия. Теоретическая геодезия : справочное пособие / Под ред. В. П. Савиных и В. Р. Ященко. – М. : Недра. 1991. – 268 с.: ил.
5. Орлов А. Я. Избранные труды. – Киев, 1961. – 130 с.
6. Sternberg J. Verbesserung der Nivellementergebnisse hoher Genauigkeit durch Anbringen einer Gezeitkorrection. // Vermessungstechnik. – 1966. – No. 3. – P. 36–42.
7. Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П. Об учете приливных поправок при изучении современных вертикальных движений земной коры // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1968. – № 3. – С. 90–97.
8. Колмогоров В. Г. Современная геодинамика Сибири по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований : монография. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 236 с.

Получено 01.12.2016

© В. Г. Колмогоров, В. А. Калюжин, А. Н. Сачкова, 2017

CALCULATION FOR AMENDMENTS LUNISOLAR TIDE THE RESULTS OF PRECISION LEVELING

Vyacheslav G. Kolmogorov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc., Professor, Department of Geomatics and Property & Infrastructure, tel. (913)941-78-90, e-mail: kolmina@mail.ru

Viktor A. Kaluzhin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Head of the Department of Geomatics and Property & Infrastructure, tel. (952)907-19-80, e-mail: Kaluzhin@mail.ru

Anastasiya N. Sachkova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D. student, Department of Geomatics and Property & Infrastructure tel. (913)469-15-50, e-mail: kaza4ka_92@mail.ru

One of the most important tasks in the study of modern geodynamic processes using geodetic and geophysical methods is to increase the accuracy of instrumental measurements, both through the development of observational techniques, and taking into account the various factors affecting the accuracy of the objects under study. One such factor is the lunar-solar tides in the Earth's crust: under the influence of centrifugal and tidal forces, under the pressure of the atmosphere and winds the elastic earth undergoes deformation.

The formulae for calculating the corrections due to the influences of the Moon and the Sun were suggested, which is very time-consuming. To accelerate and facilitate the process special nomograms for latitudes 45°, 50°, 55° and 60° were designed. In the construction of nomograms for the hour angle t values from 0° to 180° and from 180° to 360° with a step of 5°, and declination δ from -30° to +30° with a step of 5° were applied. According to nomograms plumb inclination components are selected and then are multiplied by the corresponding components of the leveling line,

which can be determined by a topographic map with a scale 1 : 25 000. Thus, the article proposes a method for determining the amendments of precision leveling during lunisolar tide using special pallets.

Key words: ground plane, tidal forces, fluctuations in the plumb line, relative height, correction, lunisolar influence, accumulated correction, nomogram.

REFERENCES

1. Kolmogorov, V. G., & Dudarev, V. I. (2014). State of the problem of complex studying of modern geodynamics of Siberia in the late twentieth century. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 4(28), 3–12 [in Russian].
2. Kolmogorov, V. G. (2012). To the question about the possibility of studying the stress-strain state of the earth's surface as a result of repeated high-precision leveling *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 1(17), 9–14 [in Russian].
3. Kolmogorov, V. G. (2010). Mathematical description of the parameters of contemporary movements of the Earth's crust *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 1(12), 70–73 [in Russian].
4. Masimov, M. M., Savinykh, V. P., & Yashchenko, V. R. (1991). *Geodeziya. Teoreticheskaya geodeziya [Surveying. Theoretical geodesy]*. Moscow: Nedra [in Russian].
5. Orlov, A. Y. (1961). *Izbrannyye trudy [Selected works]*. Kyiv [in Ukraine].
6. Sternberg, J. (1966). Verbesserung der Nivellementergebnisse hoher Genauigkeit durch Anbringen einer Gezeitkorrektur. *Vermessungstechnik*, 3, 36–42.
7. Kolmogorov, V. G., & Kolmogorov, P. P. (1968). On accounting for tidal correction in the study of modern vertical movements of the earth's crust. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestia vusov. Geodesy and aerophotography]*, 3, 90–97 [in Russian].
8. Kolmogorov, V. G. (2013). *Sovremennaya geodinamika Sibiri po rezul'tatam geodezicheskikh i geologo-geofizicheskikh issledovaniy [Modern geodynamics of Siberia according to the results of geodetic, geophysical and geological studies]*. Novosibirsk: SSGA [in Russian].

Received 01.12.2016

© V.G. Kolmogorov, V. A. Kaluzhin, A. N. Sachkova, 2017