

УДК 681.518.5:624.21

**В. П. Голюк,
Д. Г. Назаров**

ООО «Мостовое бюро»

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СТРОИТЕЛЬСТВА МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ БУХТУ ЗОЛОТОЙ РОГ В ГОРОДЕ ВЛАДИВОСТОКЕ

При строительстве вантовых мостов особое внимание уделяется разбивочным работам, при этом ошибки координат конструктивных элементов возводимого сооружения складываются из ошибок разбивочных работ и ошибок в координатах геодезической разбивочной основы. В процессе строительства пункты геодезической разбивочной основы являются исходной плано-высотной базой, при этом отдельные пункты оказываются недостаточно устойчивыми как в плане, так и по высоте, поэтому выполняются сезонные проверки (весенняя и осенняя) с последующим уравниванием сети. Необходимо, чтобы ошибки в положении геодезических пунктов оказывали минимальное влияние на разбивочные работы.

В статье предлагается комбинированный подход к контролю планового положения (трилатерация и триангуляция) и высотного (геометрическое и тригонометрическое) нивелирования. По результатам уравнивания сети дается оценка точности координат и высот пунктов геодезической разбивочной основы.

геодезическая разбивочная основа; уравнивание; оценка точности результатов измерений; трилатерация; триангуляция; геометрическое и тригонометрическое нивелирование

Введение

Строительство вантового моста через бухту Золотой Рог осуществлялось в рамках федеральной программы «Развитие Владивостока как центра международного сотрудничества в Азиатско-Тихоокеанском регионе» (рис. 1).

Мостовой переход входит в состав магистрали общегородского значения, связывающей федеральную автомобильную дорогу М-60 Усури (Хабаровск – Владивосток) с островом Русский. Переход расположен в центральной части Владивостока между улицами Гоголя и Некрасовской со стороны северных районов города и улиц Калинина, Фастовской и Надибаидзе со стороны южных районов города. Строительная длина мостового перехода – 2,1 км. По своим параметрам вантовый мост является уникальным инженерно-техническим сооружением. Проект моста оригинально решен, в первую очередь, это относится к конструкции пилонов, которые не имеют соединения в верхней части. Основные технические характеристики сооружения [1]:



Рис. 1. Мостовой переход через бухту Золотой Рог

- центральный пролет – цельнометаллический, 737 м;
- анкерный пролет – монолитный преднапряженный бетон;
- длина моста – 1387 м;
- высота пилонов – 225 м;
- подмостовой габарит – 60 м.

Мостовой переход входит в число наиболее значимых и уникальных инженерно-технических объектов и в настоящее время по праву занимает второе место среди вантовых мостов России.

1 Постановка задачи

Перед началом строительства ФГУП «ПриморАГП» была создана геодезическая разбивочная основа (ГРО), по семь пунктов на каждом берегу, с принудительным центрированием, с применением традиционных и спутниковых методов. В соответствии с нормативными документами [2] необходимо выполнять сезонную проверку пунктов ГРО не реже двух раз в год с целью обеспечения строительства и ввода в эксплуатацию мостового перехода через бухту Золотой Рог, с последующими математической обработкой результатов геодезических измерений, оценкой точности и анализом устойчивости пунктов. Точность построения ГРО (допустимая погрешность) регламентируется требованиями [3].

2 Плановое положение пунктов геодезической разбивочной основы

2.1 Сравнительная оценка точности триангуляционных и трилатерационных методов

Точность геодезических разбивочных работ должна приниматься в соответствии с требованиями [4] для различных этапов строительства, при этом погрешность геодезических измерений должна быть не более 0,2 величины отклонений [2].

Полевые наблюдения планового положения пунктов ГРО производились комбинированными методами трилатерации и триангуляции с применением точных электронных тахеометров. Необходимо отметить, что в районе водоемов в приземном слое атмосферы, как правило, образуются местные неоднородные рефракционные поля, обусловленные неравномерным распределением температуры и плотности воздуха [5]. Под влиянием боковой рефракции визирный луч подвергается искажению, что вносит погрешность в результаты угловых измерений, и ее полный учет не представляется возможным, поэтому метод триангуляции при определении планового положения пунктов на разных берегах применять нецелесообразно.

Рассмотрим произвольный треугольник ABC (рис. 2). Известно, что если в треугольнике измерены три стороны, то, применив теорему косинусов

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A, \quad (1)$$

можно вычислить и соответствующий угол треугольника по формуле

$$\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}. \quad (2)$$

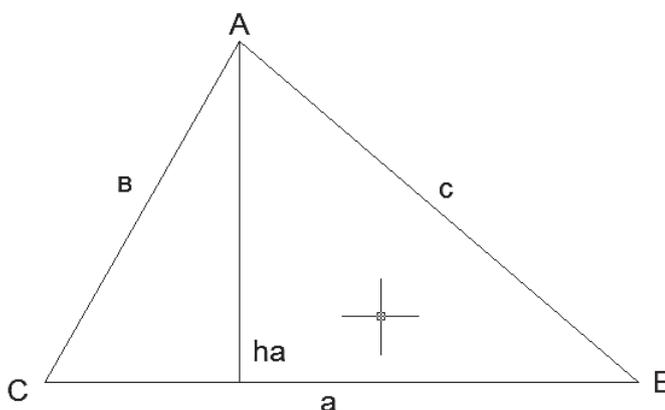


Рис. 2. Произвольный треугольник ABC

Продифференцируем (2) по a , b , c и A [6]:

$$-\sin A dA = -\frac{2a}{2bc} da + \left(\frac{b^2 - c^2 + a^2}{2b^2c} \right) db + \left(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2bc^2} \right) dc;$$

$$dA = \frac{a}{bc \sin A} \left(da - \left(\frac{b^2 - c^2 + a^2}{2ab} \right) db - \left(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} \right) dc \right),$$

где $h_a = \frac{bc \sin A}{a}$;

$$\frac{1}{h_a} = \frac{a}{bc \sin A};$$

$$\frac{b^2 - c^2 + a^2}{2ab} = \cos C;$$

$$\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} = \cos B.$$

Тогда

$$dA = \frac{1}{h_a} (da - \cos C db - \cos B dc).$$

Аналогично выполняем расчеты для углов B и C :

$$dB = \frac{1}{h_b} (db - \cos C da - \cos A dc);$$

$$dC = \frac{1}{h_c} (dc - \cos A db - \cos B da).$$

От дифференциалов переходим к поправкам измеренных длин сторон и получаем систему следующих уравнений:

$$\begin{cases} Va = \frac{\rho}{h_a} (Va - \cos CVb - \cos BVc); \\ Vb = \frac{\rho}{h_b} (Vb - \cos CVa - \cos AVc); \\ Vc = \frac{\rho}{h_c} (Vc - \cos AVb - \cos BVa). \end{cases}$$

От поправок переходим к среднеквадратичным ошибкам (СКО) углов [7]:

$$\begin{cases} m_A^2 = \frac{\rho}{h_a^2}(m_a^2 + \cos^2 C m_b^2 + \cos^2 B m_c^2); \\ m_B^2 = \frac{\rho}{h_b^2}(m_b^2 + \cos^2 C m_a^2 + \cos^2 A m_c^2); \\ m_C^2 = \frac{\rho}{h_c^2}(m_c^2 + \cos^2 A m_b^2 + \cos^2 B m_a^2). \end{cases}$$

Предположим, что стороны измеряются равноточно ($m_a = m_b = m_c = m_D$), тогда

$$\begin{cases} m_A^2 = \frac{\rho^2 m_D^2}{h_a^2}(1 + \cos^2 C + \cos^2 B); \\ m_B^2 = \frac{\rho^2 m_D^2}{h_b^2}(1 + \cos^2 C + \cos^2 A); \\ m_C^2 = \frac{\rho^2 m_D^2}{h_c^2}(1 + \cos^2 A + \cos^2 B). \end{cases}$$

Чтобы значения всех углов в треугольнике были вычислены с одинаковой точностью, должны соблюдаться следующие условия:

$$1 + \cos^2 C + \cos^2 B = 1 + \cos^2 C + \cos^2 A = 1 + \cos^2 A + \cos^2 B;$$

$$h_a^2 = h_b^2 = h_c^2.$$

Равенство выполняется при условии, что $a = b = c = D$, т.е. треугольник равносторонний ($A = B = C = 60^\circ$), тогда

$$h_a = h_b = h_c = \frac{3D}{\sqrt{2}}.$$

Следовательно, искомая СКО вычисления угла по измеренным сторонам

$$m_B^2 = m_A^2 = m_B^2 = m_C^2 = \frac{4\rho^2 m_D^2}{3D^2}(1 + 2\cos^2 60^\circ) = \frac{2\rho^2 m_D^2}{D^2};$$

т.е.

$$m_{\beta} = \frac{\rho m_D \sqrt{2}}{D}, \quad (3)$$

где m_d – СКО измерения стороны; D – измеряемая сторона; m_d/D относительная ошибка стороны; ρ – коэффициент перехода от угловых величин к линейным.

Дадим априорную оценку погрешности измерения горизонтальных углов по формуле (3) (табл. 1).

Таблица 1. Априорная оценка погрешности измерения горизонтальных углов

Априорная оценка точности		
Расстояние, м	m_d СКП, мм	m_{β} СКО''
300	2,5	2,4
500	3,0	1,8
800	3,6	1,3

Допустимые предельные погрешности [1, 2, 4, 8]:

- плановой геодезической основы ± 6 мм;
- высотного положения постоянных реперов ± 3 мм;
- высотного положения постоянных реперов ± 5 мм;
- относительная СКО базисной стороны не более 1:100 000;
- относительная СКО определения в наиболее слабом месте 1:50 000.

Исходя из анализа (3) для сезонной проверки планового положения пунктов ГРО был выбран метод трилатерации при наблюдении через водное препятствие.

2.2 Полевой этап работ

Линейные измерения выполнялись точным электронным тахеометром SET230RK3 с погрешностью измерений длин сторон $m_D = 2 \text{ мм} + 2D \text{ км}$. Схема пунктов ГРО представлена на рис. 3.

Полевые измерения производились на призмических отражателях, два раза в три приема [8]. В некоторых случаях из-за неблагоприятной схемы расположения пунктов недоступные длины сторон определялись по теореме косинусов с использованием встроенного программного обеспечения электронного тахеометра. При этом измерения выполнялись многократно с различных стоянок прибора. В измеряемые стороны вводились поправки на температуру и давление непосредственно перед наблюдениями.

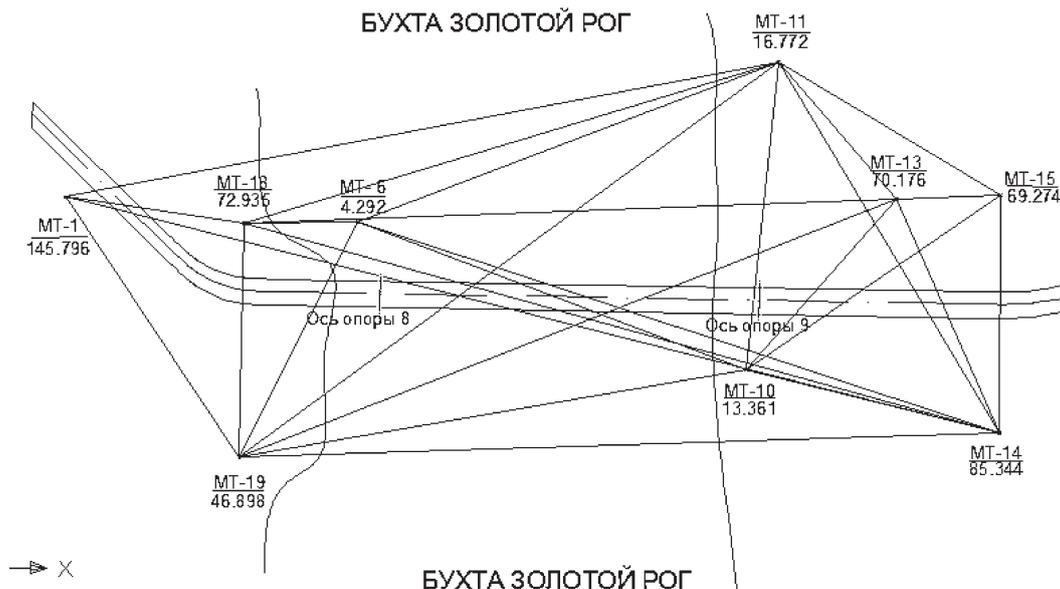


Рис. 3. Схема пунктов ГРО

2.3 Уравнивание пунктов геодезической разбивочной основы

В процессе камеральной обработки в измеренные стороны вводились поправки [9]:

– на приведение линии к уровню моря

$$\Delta H = \frac{H_{\text{ср}}}{R} \cdot D;$$

– на редуцирование на плоскость в проекции Гаусса

$$\Delta L = \frac{y^2}{2R^2} \cdot D,$$

где R – радиус Земли (6371 км); D – измеренная сторона, км.

Уравнивание сети ГРО выполнено строгим математическим методом (методом максимального правдоподобия) [10] с наложением условия $[PV^2] = \min$ по программе NV , разработанной на кафедре «Инженерная геодезия» ПГУПС профессором В. А. Коугия. В качестве исходных пунктов были приняты МТ6, МТ11, МТ10, которые по материалам полевых наблюдений менее всего подвержены сезонным колебаниям. В оценку точности включены максимальные длины сторон геодезического четырехугольника МТ1, МТ19, МТ14, МТ11, а также его диагонали.

Исходя из априорной оценки точности (см. табл. 1), погрешность определения горизонтальных углов составляет $1,3'' \div 2,4''$. При этом необходимо измерять углы высокоточными геодезическими приборами, большим числом приемов в утренние или вечерние часы, что ведет к значительной потере времени.

Использование метода трилатерации через водное препятствие позволяет оперативно и без потери точности решить поставленную задачу. По материалам уравнивания погрешности пунктов ГРО не превысили допуск ± 6 мм в плане [3], за исключением пункта МТ1 (8 мм), находящегося на значительном удалении от мостового перехода. Рекомендовано использовать МТ1 в качестве ориентирного направления.

3 Высотное положение пунктов геодезической разбивочной основы

3.1 Проверка устойчивости постоянных и временных реперов на ростверках опор

Согласно [1, 11] принято решение выполнять проверку высотных реперов проложением нивелированных ходов через репера, расположенные в фундаменте опор (№ 8 и № 9).

На опоре № 9 исходными реперами нивелирования II класса были Rp739 и Rp12, а на опоре № 8 – Rp7 и Rp8. Наблюдения выполнялись в прямом и обратном направлениях нивелиром Trimble DiNi 03. Схема высотного положения (вверху отметки – на апрель 2011 г., внизу отметки – на февраль 2012 г.) представлена на рис. 4.

Проверка постоянных реперов осуществлялась по программе нивелирования III класса согласно [5]. На опоре № 8 сезонные колебания не превысили величину 1 мм, а на опоре № 9 – 3 мм.

Погрешность колебания временных реперов на монтажных горизонтах не превысила величины 5 мм, что соответствует требованиям [4]. Передача отметок на монтажные горизонты опор производилась электронным тахеометром с применением диагональной насадки, внутри конструкции башенных кранов.

4.2 Определение погрешности связи временных реперов на монтажных горизонтах опор № 8 и № 9

В процессе монтажа русловых пролетов с разных берегов возникла необходимость уточнения высотного положения временных реперов на монтажных горизонтах.

Данный вид работ выполнен в ночное время при благоприятных метеорологических условиях.

Синхронно от постоянных реперов, находящихся в теле ростверков опор, тригонометрическим нивелированием производилась передача отметок

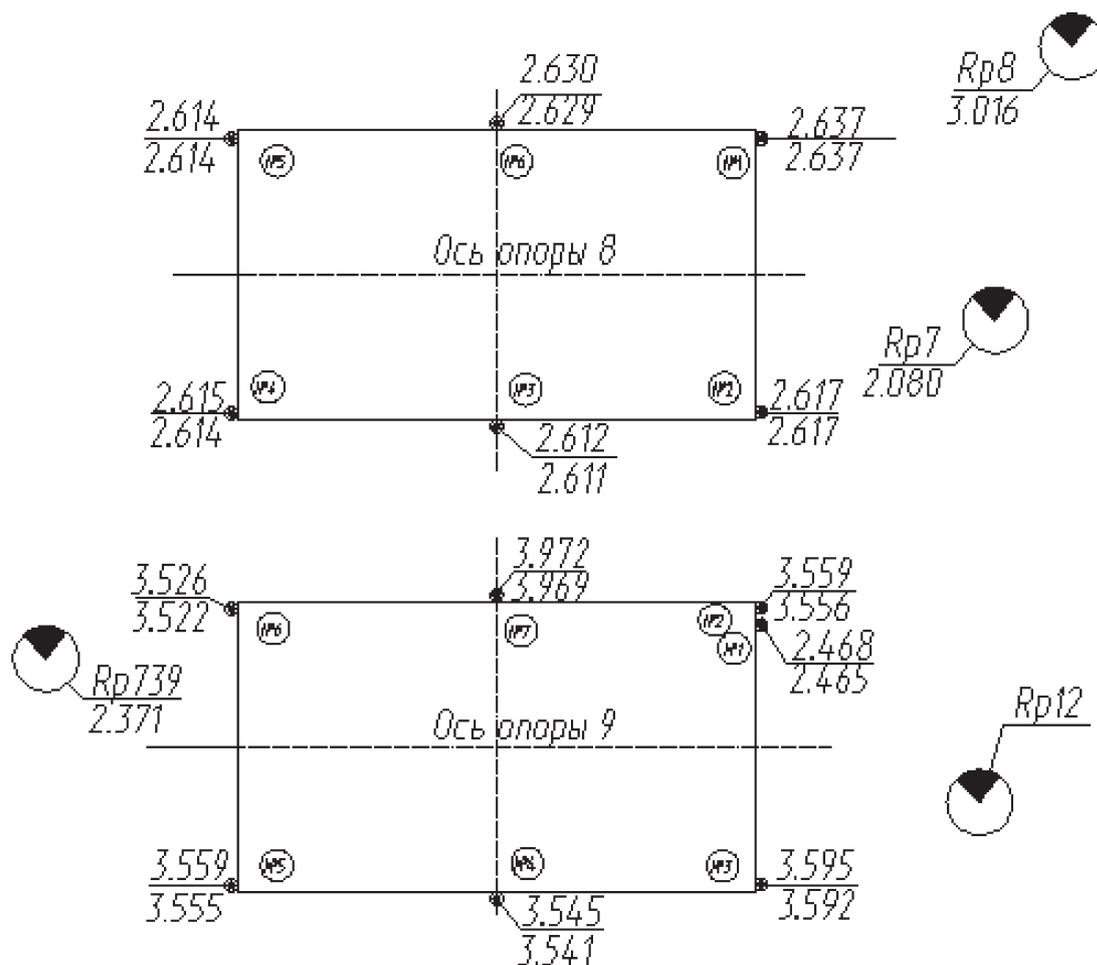


Рис. 4. Схема высотного положения реперов

на монтажный горизонт [12]. После этого, с применением геометрического нивелирования от временных реперов, находящихся на монтажном горизонте, отметки переносились от опоры № 9 на блок Б9-16 и от опоры № 8 на блок Б8-20 (расстояние между этими блоками составило 180 м). Передача высотных отметок на противоположные блоки осуществлялась с применением тригонометрического нивелирования. Полученная высотная невязка составила -18 мм в сторону опоры № 8 и $+20$ мм в сторону опоры № 9. На рис. 5 изображена схема работ по передаче отметок с опоры № 8 на опору № 9. Расчет допустимой невязки представлен в табл. 2.

Невязка между исходными реперами не превышает 3 мм и 5 мм для временных реперов, что соответствует [4]. Однако при передаче высотных отметок через водное препятствие по пролетному строению (737 м) высотная невязка по факту составила -18 мм в сторону опоры № 8 и $+20$ мм в сторону опоры № 9. Средняя погрешность -19 мм. При передаче высотных отметок по программе нивелирования II класса вокруг бухты Золотой Рог ($L = 11$ км) «ПриморАГП» допустимая невязка составила $m_h = 5\sqrt{11} = 17$ мм.

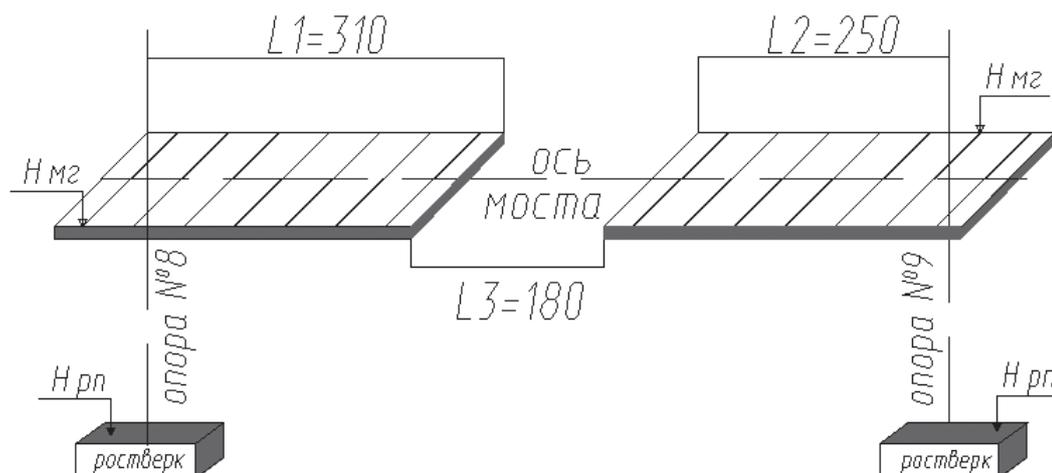


Рис. 5. Схема передачи отметок на высотный горизонт

Таблица 2. Расчет допустимой невязки

Допустимые невязки	
Геометрическое нивелирование III класса	Тригонометрическое нивелирование
$m_h = 10\sqrt{L}$, км	$m_h = \sqrt{(2 \sin z / 2 \cdot m_d)^2 + (D \cos \frac{z}{2} \cdot m_z / p)^2}$
$m_{h1} = 10\sqrt{0,31} = 5,6$ мм	$m_h = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 3)^2 + (180\,000 \cdot 0,7 \cdot 3 / 206\,265)^2} = 4,6$ мм
$m_{h2} = 10\sqrt{0,25} = 5,0$ мм	
$m_{\text{общ}} = \sqrt{m_{h1}^2 + m_{h2}^2 + m_h^2} = 9$ мм	

Из вышеизложенного следует вывод: передача высот по монтажному горизонту выполнена с минимальной погрешностью.

Заключение

Предложенная в статье методика сезонной проверки плано-высотного положения пунктов ГРО при строительстве вантового моста сочетает в себе комбинированный подход.

Дана априорная оценка погрешности применения метода трилатерации, а также косвенной трилатерации по сравнению с методом триангуляции. По методу триангуляции необходимо измерять углы высокоточными геодезическими приборами, многократно, в утренние или вечерние часы, что

ведет к значительной потере времени. Использование метода трилатерации через водное препятствие позволяет оперативно и с необходимой точностью решить поставленную задачу.

Проверка положения постоянных и временных реперов (расположенных на монтажном горизонте) выполнялась также комбинированным методом геометрического и тригонометрического нивелирования. Выполнено сравнение погрешности применяемых методов, предложена методика передачи отметок на монтажный горизонт.

По результатам полевых измерений получены откорректированные высоты контрольных точек, крайних блоков металлоконструкции пролетного строения русловой части моста. Выполнена увязка высотной составляющей на разных берегах; на основании полученных данных проектной организацией сделаны расчеты и внесены изменения для дальнейшего успешного соединения русловых частей мостового перехода.

Библиографический список

1. Проект производства геодезических работ ППГР на строительство пилонов № 8 и № 9 до отм. 175.00 / ЗАО «Институт «Гипростроймост Санкт-Петербург»». – СПб., 2010. – 250 с.
2. Геодезические работы в строительстве. СП126.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03–84. – М., 1985. – 8 с.
3. ГОСТ 21778–81. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. – М., 1981. – 11 с.
4. Мосты и трубы. СП46.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 3.06.04–91. – М., 2012. – 140 с.
5. Геодезические работы при строительстве мостов / В. А. Коугия, В. В. Грузинов, О. Н. Малковский, В. Д. Петров. – М. : Недра, 1986. – 248 с.
6. Универсальный справочник по математике / И. Б. Кожухов, А. А. Прокофьев. – М. : Лист Нью, 2003. – 544 с.
7. Коугия В. А. Избранные труды / В. А. Коугия. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – 447 с.
8. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. СП 11-104–97. – М., 1997. – 139 с.
9. Пособие по производству геодезических работ в строительстве (к СНиП 3.01.03–84). – М. : Стройиздат, 1985. – 71 с.
10. Математическая обработка геодезических сетей / П. А. Гайдаев. – М. : Недра, 1977. – 115 с.
11. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов ГКИНП (ГНТА)-03-010-03. – М. : ЦНИИГАиК, 2004. – 120 с.
12. Руководство по высшей геодезии. Ч. I. Вып. 2 / Ф. Н. Красовский, В. В. Данилов. – М. : Редбюро ГУГК при СНК СССР, 1939. – 412 с.

Golyuk Victor P., Nazarov Denis G.
Ltd «Mostovoje bjuro»

Geodetic monitoring of construction of bridge crossing of Zolotoy rog bay in Vladivostok

In the process of building of cable-stayed bridges the special attention is paid to location surveys, at that the errors of components coordinates of the raising structure are a combination of location survey errors and coordinates errors of geodetic control network (GRO). In the context of construction works the marks of GRO are the original plan and altitude basis, and at that several marks turn out to be not enough stable neither of plan nor of altitude, so seasonal checks (spring and autumn) are carried out with following station adjustment. It is necessary that errors of geodesic points location have the minimum influence on location surveys.

The article provides a combinational approach for monitoring of plan location (trilateration and triangulation) and altitude (geometrical and trigonometrical) level control. Based on the results of station adjustment the assessment of accuracy of coordinates and altitudes of GRO points.

geodetic control network; adjustment; estimation of accuracy of measuring results; trilateration; triangulation; geometrical and trigonometrical level control

References

1. Proyeckt proizvodstva geodezicheskikh rabot PPR na stroitel'stvo pilonov № 8 i № 9 do otm.175.00 [Project of working plan for PPR (project for implementation of geodetic survey) for № 8 and № 9 pylons construction up to el.175.000], ZAO «Institute Giprostroymost Saint Petersburg», 2010. – 250 p.
2. Geodezicheskiye raboty v stroitel'stve [Geodetic works in construction] SP126.13330.2012 Revised edition of SNiP 3.01.03.84. Moscow, 1985. – 8 p.
3. Sistema obespecheniya tochnosti geometricheskikh parametrov v stroitel'stve [System of ensuring of geometrical parameters accuracy in construction] GOST 21778–81. – 11 p.
4. Mosty i trubyy [Bridges and tubes] SP46.13330.2012 Revised edition of SNiP 3.06.04–91, Moscow, 2012. – 140 p.
5. Kougia V.A., Gruzinov V.V., Malkovsky O.N., Petrov V.D. Geodezicheskiye raboty pri stroitel'stve mostov [Geodetic works for bridge construction]. Moscow, Nedra, 1986. – 248 p.
6. Kozhukhov I.B., Prokof'ev A.A. Universal'nyy spravochnik po matematike [Universal reference book for Mathematics]. Moscow, ListNew, 2003. – 544 p.
7. Kougia V.A. Selecta. St.Petersburg, PSTU, 2012. – 447 p.
8. Inzhenerno geodezicheskiye izyskaniya dlya stroitel'stva [Engineering and geodetic surveys for construction] SP 11–104–97, Annex B. – 139 p.
9. Posobiye po proizvodstvu geodezicheskikh rabot v stroitel'stve [Manual for geodetic works for construction] (to SNiP 3.01.03.-84). Moscow, 1985 – 71 p.

10. Gaydaev P.A. Matematicheskaya obrabotka geodezicheskikh setey [Mathematical processing of geodetic set of points]. Moscow, Nedra, 1977. – 115 p.

11. Instruktsiya po nivelirovaniyu I, II, III, IV klassov GKINP (GNTA)-03–010–03 [Instruction for levelling of classes I, II, III, IV GKINP (GNTA)-03–010–03], Publishing house. Moscow, TsNYYGAUK, 2004. – 120 p.

12. Krasovsky F.N., Danilov V.V. Rukovodstvo po vysshey geodezii [Manual for higher geodesy], part I, vol. 2. Moscow, Red Byuro GUGK pri SNK SSSR, 1939. – 412 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии

Вал. В. Сапожниковым

Поступила в редакцию 29.11.2015, принята к публикации 19.01.2016

ГОЛЮК Виктор Петрович – ведущий инженер-геодезист ООО «Мостовое бюро».

e-mail: bridges-bureau@gpsm.ru

НАЗАРОВ Денис Григорьевич – ведущий инженер-геодезист ООО «Мостовое бюро».

e-mail: nazarovdg1916@mail.ru

© Голюк В. П., Назаров Д. Г., 2016