

УДК 528.486.3

Определение точности геодезических измерений при реконструкции исторических объектов

Н. Н. Богомолова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Богомолова Н. Н. Определение точности геодезических измерений при реконструкции исторических объектов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 693–701. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-693-701

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос назначения точности разбивочных работ на стадии реконструкции технически сложного объекта. Показать необходимость предварительного расчета точности. После назначения точности геодезических измерений осуществить проектирование геодезической сети в программном комплексе Credo.dat. Определить класс нивелирования, удовлетворяющий сформированным требованиям. **Методы:** Теория ошибок измерений, метод наименьших квадратов, параметрический способ уравнивания, моделирование геодезических сетей с использованием пакета прикладных программ. **Результаты:** Установлены требования к точности разбивочных работ на основе требований действующих нормативных документов. Рассмотрена последовательность формирования требований к точности определения положения пунктов геодезической разбивочной основы и требований к точности используемых геодезических приборов. Отдельно рассчитана точность плановой и высотной геодезических сетей. Показана возможность применения программы нивелирования III класса при создании высотной сети для удовлетворения установленных требований точности. **Практическая значимость:** На конкретном примере изложена последовательность назначения точности геодезических работ при реконструкции исторического объекта, предложенная методика может быть рекомендована к практическому использованию.

Ключевые слова: Определение точности, геодезические работы, полигонометрия, геометрическое нивелирование.

Введение

Вопрос предварительного расчета точности возникает при организации различных геодезических работ: разбивочных, исполнительных, мониторинговых. Нормативные документы содержат рекомендации по определению точности геодезических работ. Необходимая точность

геодезических наблюдений при сооружении или реконструкции объектов обеспечивается различными методами и приборами, поэтому результаты ее расчета влияют на применение тех или иных методик и средств измерений. Рассмотрим далее пример предварительного расчета точности геодезических наблюдений при реконструк-

ции исторического здания Большого драматического театра им. Товстоногова, расположенного в Санкт-Петербурге.

С 2011 по 2014 год БДТ был закрыт на капитальную реконструкцию, по окончании которой зрители увидели обновленные интерьеры и отреставрированный зал. В соответствии с проектом требовалось создание геодезической разбивочной основы для выноса осей на все горизонты реконструируемого театра.

Определение точности геодезических измерений при выносе осей в плане

В соответствии с действующими на момент реконструкции нормами было установлено, что при производстве разбивочных работ требуемая точность линейных и угловых измерений составляет 1/5000 и 20» соответственно [1]. При этом разбивочные работы планировалось производить полярным способом, опираясь на пункты геодезической разбивочной основы, которые, в свою очередь, определялись методом полигонометрии от исходных пунктов, расположенных на набережной Реки Фонтанки. Таким образом, ошибка положения выносимой в натуру точки P , закрепляющей любую из осей здания, определяется формулой [2]:

$$m_P = \sqrt{m_{P_{\text{изм}}}^2 + m_{P_{\text{исх}}}^2},$$

где $m_{P_{\text{исх}}}$ — ошибки исходных данных;

$m_{P_{\text{изм}}}$ — ошибки измерений.

Для дальнейших расчетов примем, что ввиду коротких расстояний (20 м) от пунктов сети до выносимых точек ошибки измерений будут в 2 раза меньше по сравнению с ошибками пунктов сети, т. е. $m_{P_{\text{изм}}} = 0,5m_{P_{\text{исх}}}$.

Преобразуем выражение для нахождения ошибки определения положения выносимой точки P :

$$m_P = \sqrt{\frac{1}{4}m_{\text{исх}}^2 + m_{\text{исх}}^2} = 1,1m_{\text{исх}}.$$

Ошибки измерений будут найдены как ошибки определения положения точки полярным способом [3]:

$$m_{\text{ПС}} = \sqrt{m_d^2 + d^2 m_\alpha^2 \frac{1}{\rho^2}},$$

где m_d — средняя квадратическая ошибка (далее — СКО) линейных измерений;

m_α — СКО определения углов;

d — расстояние от пункта до выносимой точки;

$\rho = 206\,265$ — число секунд в радиане.

Исходя из схемы проектирования сети (рис. 1), примем для расчетов, что максимальное удаление выносимой точки от пункта геодезической разбивочной сети не будет превосходить 20 м. Тогда СКО измерения длин линий, исходя из величины относительной ошибки 1/5000, составит 4 мм. Подставив в формулу приведенные значения, определим ошибку определения выносимой точки, она составит 4,4 мм.

Следовательно, СКО определения положения пунктов геодезической разбивочной сети не должно превышать:

$$m_{\text{исх}} = 2m_{\text{изм}} = 8,8 \text{ мм.}$$

Вычислим необходимую СКО определения положения выносимой точки:

$$m_P = 1,1m_{\text{исх}} = 9,7 \text{ мм.}$$

Проектирование плановой геодезической разбивочной основы

Для геодезического обеспечения реконструкции здания театра предполагалось создание плановой геодезической сети методом полигонометрии. Схема сети представлена на рис. 2.

В качестве исходных пунктов для проложения полигонометрического хода было принято два пункта $OS6$ ($x = 452,620$ м, $y = 263,571$ м) и $OS9$ ($x = 446,893$ м, $y = 283,147$ м), закрепленных на набережной Реки Фонтанки, с которых выпол-

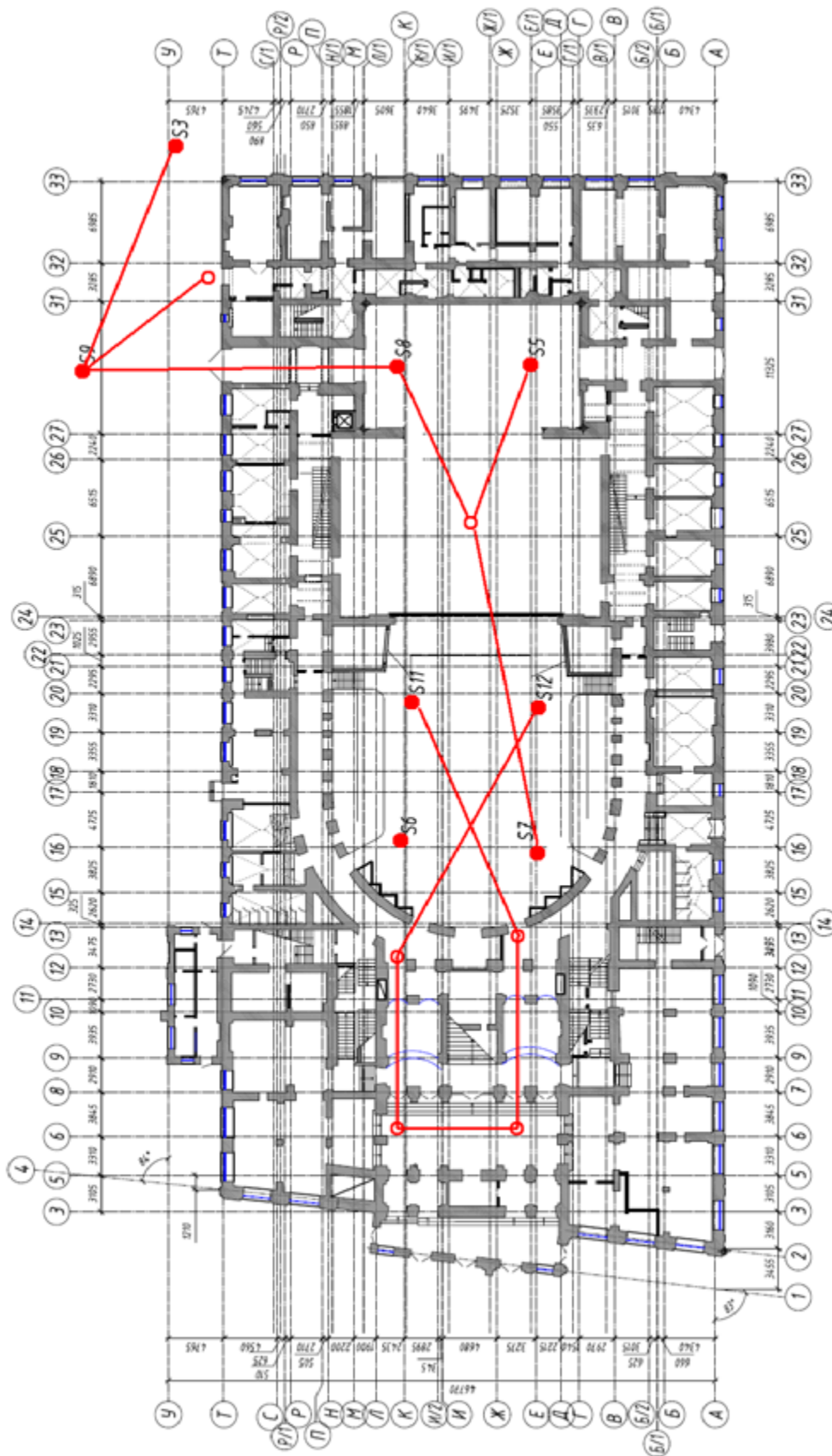


Рис. 1. Проект расположения пунктов сети на 1 этаже (закрашенные точки — пункты сети, незакрашенные точки — точки закрепляемых осей)

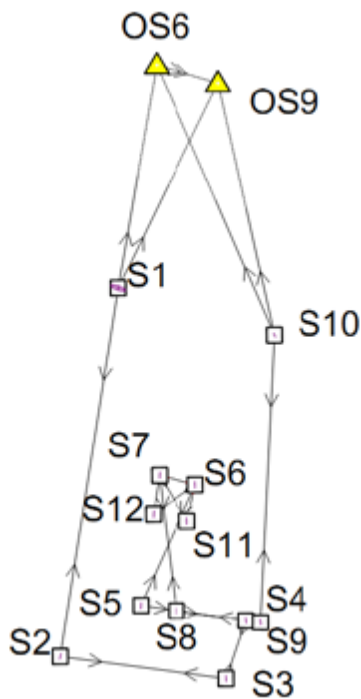


Рис. 2. Схема проектируемой сети

нялся мониторинг деформаций здания театра и окружающей застройки. Помимо двух исходных пунктов требовалось заложить 12 новых пунктов, из них 6 пунктов с внешней стороны театра и 6 пунктов внутри театра (2 на сцене, 4 в зрительном зале). Пункты предполагалось закреплять в асфальт, бетон и гранитную набережную. Для установления точности проектируемой геодезической сети по схеме были определены приближенные координаты пунктов.

При определении координат пунктов внутренней разбивочной сети предполагалось использование метода полигонометрии по трехштанговой системе. На основе приближенных координат станций по вычисленным углам и расстояниям была составлена модель измерений.

Исходные пункты сети $OS6$, $OS9$ были приняты безошибочными, ожидаемые погрешности измерений: для направлений — $1''$, для расстояний — 1 мм. Проектирование выполнялось в программном продукте *КРЕДО ДАТ*.

В результате было установлено, что при заданной конфигурации сети средние квадратические погрешности определения положения всех пунктов сети не превышают 7 мм, а наиболее слабыми являются пункты сети $S2$ и $S3$, ошибки которой составляют: $m_x = 1$ мм, $m_y = 7$ мм и $M = 7$ мм (табл. 1, 2). В представленных таблицах: a , b — размеры полуосей эллипсов ошибок, проекции полуосей на координатные оси равны составляющим m_x , m_y , СКО положения пунктов, M — значение СКО планового положения определяемого пункта, α — угол наклона большой полуоси к оси абсцисс.

Наиболее слабой стороной является $S2-S1$, ее погрешность вдоль стороны — 1 мм, поперек стороны — 4 мм.

Результаты проектирования сети подтверждают возможность использования предложенной модели с обеспечением заданной точности и простотой исполнения.

Для производства работ по закреплению осей здания на 2, 3, 4 этажах, а также в подвальном и чердачном помещениях было необходимо создание геодезической основы, удовлетворяющей заявленным выше требованиям по точности. Ниже рассмотрен один из возможных вариантов построения схемы сети на втором этаже. В данном варианте сеть опирается на два исходных пункта, расположенных на набережной Реки Фонтанки, при этом при создании пунктов на втором этаже реализуется возможность передачи координат с первого этажа через оконные проемы возле сцены театра.

Технология создания сети предполагала применение трехштанговой системы, схема сети второго этажа театра изображена на рис. 3, результаты предварительного расчета точности — в табл. 3.

В результате было установлено, что в предложенной модели сети наиболее слабыми пунктами будут пункты 12, 13 с ошибками $m_x = 10$ мм,

ТАБЛИЦА 1. Априорная оценка точности положения пунктов сети

Пункт	M , м	m_x , м	m_y , м	a	b	α
1	2	3	4	5	6	7
S1	0,003	0,001	0,002	0,002	0,001	108°06'37,96"
S2	0,007	0,002	0,006	0,006	0,001	102°01'02,56"
S3	0,007	0,001	0,007	0,007	0,001	85°47'41,04"
S4	0,006	0,001	0,006	0,006	0,001	83°02'43,52"
S5	0,006	0,001	0,006	0,006	0,001	94°18'18,02"
S6	0,005	0,001	0,004	0,004	0,001	87°37'42,81"
S7	0,004	0,001	0,004	0,004	0,001	92°49'06,22"
S8	0,006	0,001	0,006	0,006	0,001	89°50'59,03"
S9	0,006	0,001	0,006	0,006	0,001	80°44'01,47"
S10	0,003	0,001	0,003	0,003	0,001	67°01'04,79"
S11	0,005	0,001	0,005	0,005	0,001	89°06'58,13"
S12	0,005	0,001	0,005	0,005	0,001	93°17'45,97"

$m_y = 2$ мм и $M = 10$ мм, что превышает заданную величину 8,8 мм. Уменьшения СКО пунктов 12, 13 возможно добиться путем увеличения числа приемов при измерении углов.

Определение точности геодезических измерений при выносе осей по высоте

Согласно установленным требованиям, средняя квадратическая погрешность определения превышения на станции при производстве разбивочных работ не должна превышать 2,5 мм.

Исходя из предварительной схемы работ, закреплять оси здания театра по высоте было предложено с одной станции, передавая отметку с исходного репера. При этом заданная точность обеспечится выбором соответствующей модели нивелира.

Для определения высот точек, закрепляющих оси здания театра, должны быть проложены ходы геометрического нивелирования. Согласно предварительной схеме, длина ходов нивелирования на всех этажах здания должна составить более 1 км. Для того чтобы исключить влияние ошибок исходных данных на результаты разбивочных работ, необходимо создать геодезическую высот-

ную основу, ошибки которой пренебрежимо малы по сравнению с ошибками выноса осей театра, т. е.:

$$m_n = \frac{2,5}{3} = 0,8 \text{ мм.}$$

Определим, соблюдается ли условие, что при СКО, равной 0,8 мм, невязка не превысит 10 мм [4–7]:

$$f_h \leq 10 \text{ мм} \sqrt{L},$$

где 10 мм — предельная допустимая ошибка на 1 км хода.

Средняя квадратическая погрешность определения превышения на 1 км хода будет в 2,5 раза меньше предельной и составит 4 мм. При длине визирного луча 20 м — в 1 км нивелирного хода будет 25 установок нивелира и ошибка превышения на станции будет равна 0,8 мм.

Допустимая невязка 10 мм соответствует требованиям программы нивелирования III класса. Наиболее слабый пункт будет располагаться в середине хода, и его ошибка составит 2,8 мм.

ТАБЛИЦА 2. Каталог приближенных координат пунктов планового обоснования

Пункт	х, м	у, м	Дирекционный угол	На пункт
1	2	3	4	5
OS6	452,620	263,571		
OS9	446,893	283,147		
S1	381,500	251,300	9°47'21,82"	OS6
			25°57'59,45"	OS9
			188°52'02,09"	S2
S2	264,200	233,000	8°52'02,09"	S1
			97°32'41,24"	S3
S3	257,220	285,700	277°32'41,24"	S2
			18°46'48,97"	S4
S4	275,600	291,950	198°46'48,97"	S3
			278°17'44,68"	S5
S5	280,470	258,550	98°17'44,68"	S4
			24°19'32,68"	S6
S6	318,850	275,900	204°19'32,68"	S5
			284°40'55,08"	S7
			193°02'11,96"	S11
			235°21'18,33"	S12
S7	321,850	264,450	104°40'55,08"	S6
			172°51'31,04"	S8
			148°38'59,71"	S11
			188°50'03,08"	S12
S8	278,750	269,850	352°51'31,04"	S7
			97°51'14,54"	S9
S9	275,060	296,600	277°51'14,54"	S8
			2°45'35,09"	S10
S10	366,650	301,015	182°45'35,09"	S9
			336°27'52,55"	OS6
			347°26'47,57"	OS9
S11	307,405	273,250		
S12	309,625	262,550		

Заключение

В работе описана методика формулирования требований точности геодезических измерений на основании данных нормативных документов. В качестве них для предрасчета точности геоде-

зических измерений приняты следующие величины: относительная ошибка линейных измерений — 1/5000, СКО угловых измерений $m_{\beta} = 20''$, СКО определения превышения на станции нивелирования $m_h = 2,5$ мм.

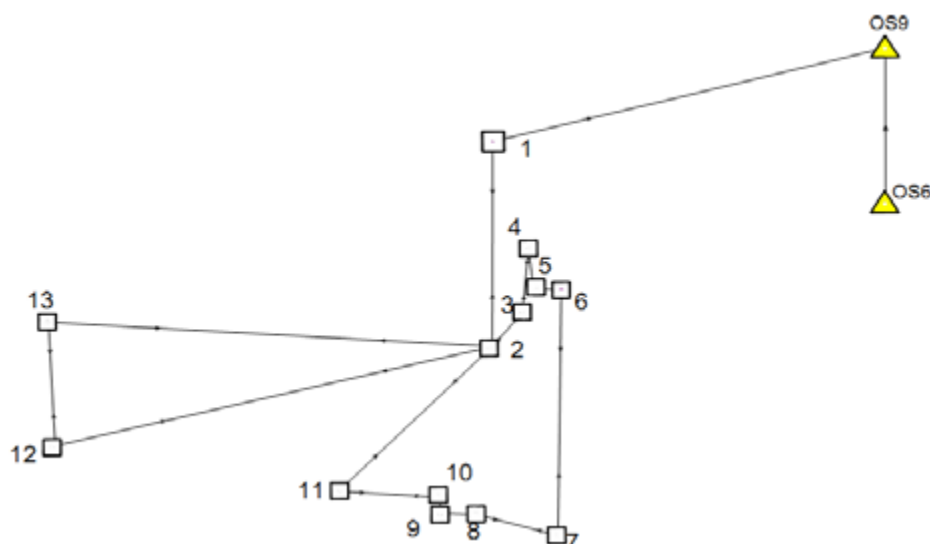


Рис. 3. Схема разбивочной сети (2 этаж)

ТАБЛИЦА 3. Результаты априорной оценки точности положения пунктов по результатам проектирования сети

Пункт	M , м	m_x , м	m_y , м	a	b	Дирекционный угол
1	2	3	4	5	6	7
1	0,005	0,005	0,002	0,005	0,001	22°48'35,30"
2	0,005	0,005	0,000	0,005	0,000	0°00'00,00"
3	0,005	0,005	0,001	0,005	0,001	5°25'15,82"
4	0,006	0,005	0,002	0,005	0,001	11°02'47,85"
5	0,006	0,005	0,001	0,005	0,001	6°22'49,20"
6	0,005	0,005	0,002	0,005	0,002	6°22'03,64"
7	0,006	0,005	0,003	0,005	0,003	161°35'33,98"
8	0,006	0,006	0,003	0,006	0,002	163°49'12,73"
9	0,007	0,006	0,003	0,006	0,002	164°43'16,18"
10	0,006	0,006	0,003	0,006	0,002	166°20'48,29"
11	0,007	0,007	0,002	0,007	0,002	168°42'56,32"
12	0,010	0,010	0,002	0,010	0,002	173°22'19,60"
13	0,010	0,010	0,002	0,010	0,002	1°45'16,51"

Создание плановой разбивочной сети предложено осуществлять методом полигонометрии по трехштативной системе, разбивочные работы производить полярным способом. В результате расчета сформированы следующие требования по точности: СКО положения выносимой точки, закрепляющей ось здания театра, $m_D = 11$ мм; СКО положения самого слабого пункта плановой разбивочной сети $m_{x,y} = 9,7$ мм. На основе модельных исследований рассмотрены возможные схемы

сети, определены их характеристики, произведена оценка точности.

В результате расчетов установлено, что вертикальные разбивочные работы по закреплению осей здания театра следует производить с одной станции при помощи нивелира, обеспечивающего заданную точность $m_n = 2,5$ мм. Геодезическую высотную основу предложено создавать по программе нивелирования III класса.

Библиографический список

1. СНиП 3.01.03—84. Геодезические работы в строительстве. — Утв. постановлением Госстроя СССР от 4 февраля 1985 года № 15. — М.: ФГУП ЦПП, 2006. — 28 с.

2. Зайцев А. К. Геодезические методы исследования деформаций сооружений / А. К. Зайцев, С. В. Марфенко, Д. Ш. Михелев и др. — М.: Недра, 1991. — 272 с.

3. Киселев М. И. Геодезия: учебник для проф. вузов / М. И. Киселев. — М., 2004.

4. Маркузе Ю. И. Основы уравнильных вычислений / Ю. И. Маркузе. — М.: Недра, 1990. — 240 с.

5. Маркузе Ю. И. Теория математической обработки геодезических измерений. Книга 2. Основы метода наименьших квадратов и уравнильных вычислений: учеб-

ное пособие / Ю. И. Маркузе. — М.: МИИГАиК, 2005. — 280 с.

6. Марфенко С. В. Геодезические работы по наблюдению за деформациями сооружений: учебн. пособие / С. В. Марфенко. — М.: МИИГАиК, 2004. — 36 с.

7. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. — М.: Картогеоцентр — Геодезиздат, 2004. — 226 с.

Дата поступления: 04.08.2022

Решение о публикации: 05.10.2022

Контактная информация:

БОГОМОЛОВА Наталья Николаевна — канд. техн. наук, доц.; nbogomolova@yandex.ru

Accuracy Appointment for Geodetic Measurements in Historical Object Reconstruction

N. N. Bogomolova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Bogomolova N. N. Accuracy Definition for Geodetic Measurements in Historical Object Reconstruction // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 693–701. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-693-701

Summary

Purpose: To consider the issue of the assignment of marking work accuracy at reconstruction stage of a technically complex object. To show the need in accuracy preliminary calculation. After the assignment of geodetic measurement accuracy, to perform geodetic network designing in Credo.dat software package. To determine leveling class that satisfies formed requirements. **Methods:** Measurement error theory, least squares method, parametric adjustment method, modeling of geodetic networks using package of applied programs. **Results:** Requirements for the accuracy of marking works were established based on the ones of current regulatory documents. The sequence of the formation of requirements for definition of accuracy in geodetic staking base locations and requirements for the accuracy of used geodetic instruments is considered. Separately, the accuracy of planned and altitudinal geodetic networks is calculated. The possibility to apply class III leveling program when creating altitudinal network to meet accuracy established requirements is shown. **Practical significance:** The sequence of geodetic work accuracy assignment during historical object reconstruction is outlined on a particular example, the proposed methodology can be recommended for a practical use.

Keywords: Appointment of accuracy, geodetic works, geodetic monitoring, polygonometry, geometric leveling.

References

1. SNiP 3.01.03-84 *Geodezicheskie raboty v stroitel'stve*. — utv. postanovleniem Gosstroya SSSR ot 4 fevralya 1985 goda N 15 [SNiP 3.01.03-84 Geodetic works in construction. — approved. Decree of the Gosstroy of the USSR of February 4, 1985 N 15]. Moscow: FGUP TsPP Publ., 2006. 28 p. (In Russian)

2. Zaytsev A. K. *Geodezicheskie metody issledovaniya deformatsiy sooruzheniy* [Geodetic methods for studying the deformations of structures]. Moscow: Nedra Publ., 1991. 272 p. (In Russian)

3. Kiselev M. I. «*Geodeziya: uchebnik dlya prof.vuzov*» [“Geodesy: a textbook for professional universities”]. Moscow, 2004. (In Russian)

4. Markuze Yu. I. *Osnovy uravnitel'nykh vychisleniy* [Fundamentals of equalizing calculations]. Moscow: Nedra Publ., 1990. 240 p. (In Russian)

5. Markuze Yu. I. *Teoriya matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmereniy. Kniga 2. Osnovy metoda*

naimen'shikh kvadratov i uravnitel'nykh vychisleniy [Theory of mathematical processing of geodetic measurements. Book 2. Fundamentals of the method of least squares and equalizing calculations]. Moscow: MIIGAiK Publ., 2005. 280 p. (In Russian)

6. Marfenko S. V. *Geodezicheskie raboty po nablyudeniyu za deformatsiyami sooruzheniy* [Geodetic work on monitoring the deformations of structures]. Moscow: MIIGAiK Publ., 2004. 36 p. (In Russian)

7. *Instruktsiya po nivelirovaniyu I, II, III i IV klassov* [Instructions for leveling I, II, III and IV classes]. Moscow: Kartgeotsentr-Geodezizdat Publ., 2004. 226 p. (In Russian)

Received: August 04, 2022

Accepted: October 05, 2022

Author's information:

Natalia N. BOGOMOLOVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; nbogomolova@pgups.ru