

А. В. Никонов^{1}, А. В. Галлер¹*

Обоснование предельной длины теодолитных ходов при создании крупномасштабных топографических планов

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: sibte@bk.ru

Аннотация. Технические характеристики съемочной геодезической сети в виде теодолитных ходов регламентируются сводом правил СП 317.1325800.2017. Этим документом установлена предельная длина теодолитных ходов, в частности, при создании съемочного обоснования топографической съемки масштаба 1:500 длина хода не должна превышать 1,2 км. В статье представлены результаты предрасчета точности вытянутых теодолитных ходов, прокладываемых электронными тахеометрами. В предрасчете учтены ошибки за центрирование тахеометра и отражателя. При использовании вехи с круглым уровнем ошибка центрирования отражателя может достигать 6 мм. Установлено, что предельная длина теодолитного хода может быть увеличена в три раза (до 3,6 км). Отмечено, что при создании съемочной сети оптимально комбинировать два метода: спутниковые определения и теодолитные ходы.

Ключевые слова: электронный тахеометр, теодолитный ход, предельная длина хода, съемочное обоснование, точность, предрасчет точности, ошибка центрирования

A. V. Nikonov^{1}, A. V. Galler¹*

Development of the maximum permissible length of theodolite traverses when creating large-scale topographic plans

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: sibte@bk.ru

Abstract. The technical characteristics of the geodetic survey network in the form of theodolite traverses are regulated by the rules and regulations SP 317.1325800.2017. The maximum length of theodolite traverses are establishes this document. In particular, when creating a geodetic network for a topographic survey at a scale of 1:500, the traverse length should not exceed 1,2 km. The article presents the results of pre-calculation of the accuracy of elongated theodolite traverses, laid by total stations. The pre-calculation takes into account errors for the centering of the total station and the reflector above geodetic point. When using a rod with a round level, the reflector centering error can reach 6 mm. It has been established that the maximum length of the theodolite traverse can be increased three times (up to 3,6 km). Combine two methods (GPS-determinations and theodolite traverses) for construction of geodetic survey network are recommended.

Keywords: total station, theodolite traverse, maximum permissible length of traverse, geodetic survey network, accuracy, apriority accuracy calculation, centering error

Введение

Инженерно-топографические планы, представленные в аналоговом или в цифровом векторно-топологическом виде (цифровая модель местности) явля-

ются исходной информацией для проектирования промышленных комплексов, инженерных сооружений, а также служат основой при планировании развития территорий. В настоящее время применяются различные методы создания крупномасштабных топографических планов: аэрофотосъемка (с самолетов и беспилотных летательных аппаратов), тахеометрическая съемка, съемка с применением спутниковой геодезической аппаратуры (ГНСС метод), лазерное сканирование (наземное, воздушное, мобильное) [1–5]. Указанные методы могут применяться как самостоятельно, так и в комбинации. Выбор метода зависит от множества факторов, например: площади съемки, формы исследуемого участка (линейный или площадной объект), особенностей местности (рельеф, залесенность или заболоченность, наличие дорог и подземных коммуникаций и т. д.). В каждом конкретном случае должна быть обоснована экономическая эффективность применения того или иного метода съемки. Несомненно, что при проведении изысканий на обширных территориях наиболее целесообразно применение съемки с применением беспилотных летательных аппаратов, в то же время, при работе в залесенной, застроенной местности эффективнее применение метода электронной тахеометрии.

При проведении тахеометрической съемки создание съемочного геодезического обоснования может производиться как проложением инструментальных ходов (полигонометрия, теодолитные ходы), так и с применением ГНСС технологий. Наилучших результатов можно достичь путем комбинирования этих двух методов. Создание опорной геодезической сети (ОГС) обычно создается спутниковыми приемниками в статическом режиме сетевым методом [6]. Опираясь на пункты ОГС, выполняется сгущение сети: на местности закрепляются попарно точки (с обеспечением взаимной видимости, на расстоянии 150–250 м друг от друга), координаты которых определяются методом спутниковых определений в статическом режиме и в отдельных случаях – в режиме RTK [5, 6]. Определенные таким образом на местности «сдвоенные» точки сети сгущения являются исходными для проложения теодолитных ходов (съемочного обоснования). Ключевым вопросом при реализации данной технологической схемы является предельное расстояние между попарно закрепленными точками сети сгущения или иными словами – предельная длина теодолитного хода.

Основные технические параметры съемочной геодезической сети, создаваемой в виде теодолитных ходов с применением электронных тахеометров, регламентируются сводом правил [7]. Ранее, основным документом по созданию крупномасштабных планов являлась инструкция [8]. В табл. 1 приведем сравнительный анализ требований этих документов.

В инструкции допустимые средние квадратические ошибки (СКО) определения координат пунктов съемочной сети не указываются прямо. Этот допуск установлен следующим образом: предельные погрешности положения пунктов плановой съемочной сети относительно исходных пунктов не должны превышать на открытой местности и на застроенной территории 0,2 мм в масштабе плана и 0,3 мм – на местности, закрытой древесной и кустарниковой растительностью. Для перехода от предельной ошибки к СКО, первая делилась на два (ко-

эффицент соотношения между предельной и средней квадратической ошибкой $t=2$). Как следует из табл. 1, значения СКО в своде правил [7] для масштаба 1:500 и 1:2000 несколько увеличены в сравнении со значениями из инструкции [8] (показано курсивом).

Таблица 1

Сравнение требований нормативных документов к созданию съемочных геодезических сетей в виде теодолитных ходов

Масштаб	Предельная длина хода, км		СКО определения координат пунктов съемочной сети относительно исходных пунктов, м, не более			
	Инструкция [8], (при относительной ошибке 1:2000)	Свод правил [7]	на застроенной территории или на открытой местности		на незастроенной территории, закрытой растительностью	
			Инструкция [8]	Свод правил [7]	Инструкция [8]	Свод правил [7]
1:5000	4,0	8,0	0,50	0,50	0,75	0,75
1:2000	2,0	4,0	0,20	0,25	0,30	0,35
1:1000	1,2	2,5	0,10	0,10	0,15	0,15
1:500	0,6	1,2	0,05	0,08	0,08	0,10

Также из табл. 1 следует, что действующим сводом правил [7] предельная длина теодолитного хода увеличена в два раза. В [7] предельная абсолютная невязка хода определена как 1:4000 от длины хода. Ранее, для благоприятных условий предельная относительная ошибка теодолитного хода принималась 1:2000. По-видимому, увеличение предельной длины хода в два раза выполнено авторами свода правил за счет повышения точности линейных измерений в два раза.

Инструкцией [8] длины сторон хода для незастроенных территорий ограничивались в пределах от 40 до 350 м. Тогда при относительной ошибке линейных измерений 1:2000 абсолютные ошибки составят от 20 до 175 мм. В настоящее время электронные тахеометры позволяют измерять длины линий с погрешностью 2 мм. Также, в прошлом предполагалось, что углы в теодолитном ходе измеряются с ошибкой 30", в то время как современные тахеометры имеют паспортную СКО угловых измерений 5". Таким образом, применение тахеометров позволяет повысить точность измерения углов в 6 раз, расстояний – не менее чем в 10 раз (в сравнении с устаревшими технологиями). В этой связи увеличение в своде правил [7] предельной длины хода только в два раза выглядит не вполне убедительным, поэтому обоснование увеличения предельной длины теодолитного хода является актуальной задачей.

Методы и материалы

В качестве съемочного обоснования при инженерно-геодезических изысканиях линейных сооружений (дорог, газопроводов и т.д.) нередко прокладываются вытянутые теодолитные ходы [5]. Дальнейшие рассуждения будем строить

применительно к проложению ходов вытянутой формы, служащих съемочным обоснованием съемки масштаба 1:500.

Для уточнения технических характеристик теодолитных ходов произведем их предрасчет точности в программном продукте КРЕДО ДАТ. На точность проложения теодолитного хода оказывают влияние следующие ошибки: инструментальные (СКО измерения угла и расстояния), ошибки за центрировку и редукцию, ошибки внешних условий. Эти ошибки должны быть учтены при проведении предрасчета точности хода.

На производстве наиболее распространены тахеометры с СКО измерения углов $m_{\beta} = 5''$, расстояний – $m_S = 2$ мм. С помощью оптического или лазерного отвеса отцентрировать тахеометр над точкой можно с ошибкой 1–2 мм. Влияние внешних условий выражается в размытии или колебании изображения визирной цели, что при предрасчете точности может быть учтено путем увеличения паспортного значения СКО измерения угла (с $5''$ до 10–15'').

При выполнении предрасчета точности хода важно корректно учесть влияние внецентренности отражателя. Обычно в теодолитных ходах отражатель на точке устанавливается посредством вехи (трехштативная система применяется, как правило, в полигонометрии). Следовательно, точность измерения горизонтальных углов в теодолитном ходе зависит от тщательности установки вехи с отражателем в отвесное положение. Для начала заметим, что современные вехи снабжаются различными круглыми уровнями: на одних нанесена только одна окружность (рис. 1а), в пределах которой должен находиться пузырек, на других – таких окружности две и имеет место понятие цены деления уровня (рис. 1б).

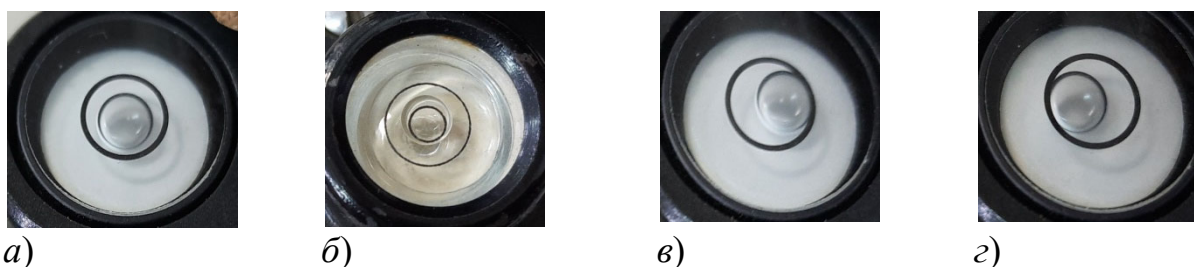


Рис. 1. Круглые уровни на вехе:

а – с одной окружностью на ампуле; б – с двумя окружностями на ампуле; в – крайнее правое положение пузырька; з – крайнее левое положение пузырька

Не на всех уровнях указана их точность, поэтому имеет смысл провести исследование, цель которого – определить, на какой угол отклоняется ось вехи от отвесной линии при нахождении пузырька круглого уровня в пределах нанесенной на ампулу большой окружности.

При исследовании веха закреплялась неподвижно посредством кронштейна. На расстоянии $S=6,2$ м от вехи устанавливался тахеометр. Сначала пузырек уровня на вехе приводился в крайнее правое положение по отношению к коллимационной плоскости прибора (рис. 1 в), выполнялось наведение сетки нитей на

верх вехи и брался отсчет по горизонтальному кругу a_1 . Затем веха наклонялась, пузырек занимал крайнее левое положение (рис. 1а), после наведения на центр вехи брался отсчет a_2 . Разность отсчетов (малый угол α на рис. 2) составила $\alpha = a_2 - a_1 \approx 6'$. Схема эксперимента представлена на рисунке 2.

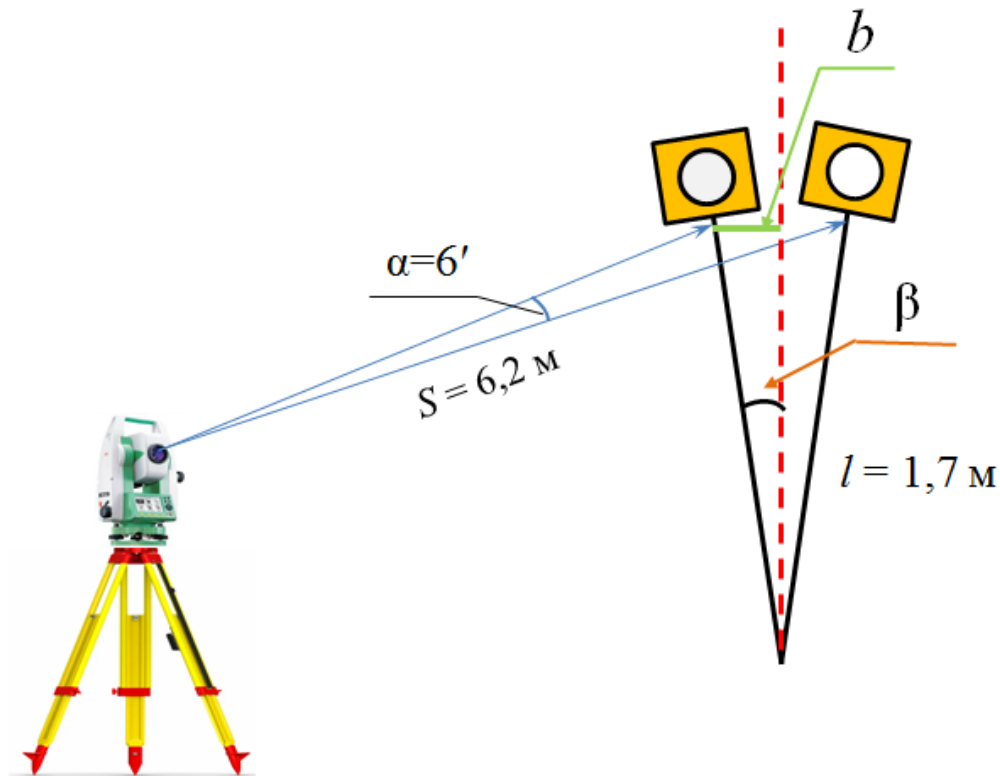


Рис. 2. Схема исследования круглого уровня вехи

Несовпадение проекций на горизонтальную плоскость центра отражателя и точки постановки вехи вычислялось по формуле:

$$b = \frac{(a_2 - a_1) \times S}{2\rho} = \frac{6' \times 6200}{2 \times 3438'} = 5,4 \text{ мм.} \quad (1)$$

Зная длину вехи l , можно вычислить ее наклон β :

$$\beta = \frac{b \times \rho}{l} = \frac{5,4 \times 3438'}{1700} = 10,9' \approx 11'. \quad (2)$$

Таким образом, при нахождении пузырька уровня в пределах большой окружности, что имеет место быть при удержании вехи помощником, отклонение вехи от отвесной линии может достигать $\beta = 11'$. При исследовании круглого уровня другой вехи эта величина составила $\beta = 5'$. Следовательно, при длине вехи $l = 1,7$ м внецентренность b отражателя может составлять 2–6 мм.

Выполним предрасчет точности вытянутого теодолитного хода в программном продукте КРЕДО ДАТ принимая следующие параметры: точность измерения углов $m_{\beta} = 5 \dots 15''$, точность измерения длин линий $m_S = 2$ мм, точность центрирования тахеометра $m_T = 2 \dots 10$ мм, точность центрирования отражателя $m_o = 6 \dots 10$ мм. Результаты предрасчета представим в табл. 2.

Таблица 2

Результат предрасчета точности теодолитного хода длиной 1200 м

Варианты влияния ошибок центрирования прибора $m_{ц}$ и отражателя m_o	Средние квадратические ошибки положения пункта в «слабом» месте хода (мм) при различной средней длине сторон $S_{ср}$ и точности измерения горизонтальных углов								
	$S_{ср} = 68$ м (20 сторон)			$S_{ср} = 175$ м (7 сторон)			$S_{ср} = 265$ м (5 сторон)		
	5''	10''	15''	5''	10''	15''	5''	10''	15''
$m_T = 2$ мм, $m_o = 6$ мм	51	54	58	16	20	25	13	17	22
$m_T = 6$ мм, $m_o = 6$ мм	68	70	73	21	24	28	16	19	24
$m_T = 10$ мм, $m_o = 10$ мм	113	114	116	34	36	39	25	27	31

Как следует из табл. 2, при минимальной длине сторон в ходе (около 60 м) точность планового положения пунктов в меньшей степени зависит от точности измерения горизонтальных углов. Рассчитаем влияние наклона вехи на ошибку направления [9]:

$$\delta = \frac{l \times \sin \beta \times 206265}{S} = \frac{1,7 \times 660}{60} \approx 19'', \quad (3)$$

где δ – ошибка в направлении; l – длина вехи; S – расстояние от тахеометра до вехи; β – отклонение оси вехи от отвесной линии ($\beta = 11'$).

Таким образом, при минимальной длине сторон в ходе влияние наклона вехи на направление существенно и превышает паспортную точность прибора в четыре раза. Поэтому при измерении углов в теодолитном ходе рекомендуется выполнять визирование на гвоздь (шпильку), установленный непосредственно на точке хода. Однако, это возможно только при отсутствии высокой растительности.

Из табл. 2 также следует, что СКО определения координат пунктов съемочного обоснования практически во всех случаях не превышает допустимого значения для застроенной или открытой местности – 80 мм. Лишь при грубом центрировании прибора и цели и коротких длинах сторон хода ошибки превосходят установленный допуск.

Смоделируем проложение аналогичного вытянутого теодолитного хода длиной 3600 м, сохраняя предельное количество станций – 20 (средняя длина стороны в этом случае составит 200 м). Результаты предрасчета представлены в табл. 3.

Результат предрасчета точности теодолитного хода длиной 3600 м

Варианты влияния ошибок центрирования прибора $m_{ц}$ и отражателя $m_{о}$	Средние квадратические ошибки положения пункта в «слабом» месте хода (мм) при различной средней длине сторон $S_{ср}$ и точности измерения горизонтальных углов								
	$S_{ср} = 200$ м (20 сторон)			$S_{ср} = 292$ м (15 сторон)			$S_{ср} = 413$ м (9 сторон)		
	5"	10"	15"	5"	10"	15"	5"	10"	15"
$m_{т}=2$ мм, $m_{о}=6$ мм	62	80	105	43	64	88	30	48	69
$m_{т}=6$ мм, $m_{о}=6$ мм	78	94	116	52	71	93	34	51	71
$m_{т}=10$ мм, $m_{о}=10$ мм	123	134	150	79	92	111	49	62	79

Как следует из табл. 3, для того, чтобы СКО положения пункта в «слабом» месте хода не превышала допуска 80 мм, необходимо измерять углы с ошибкой не более 10". При длинах сторон порядка 200 м следует центрировать тахеометр с точностью 1–2 мм. При увеличении длин сторон в ходе количество точек стояния сокращается, влияние ошибок за центрирование снижается и СКО положения пунктов уменьшаются. В этом случае допускается менее точно центрировать тахеометр ($m_{т} = 5–6$ мм).

Обсуждение

Попытки внести коррективы в требования инструкции [8], связанные с внедрением в производство современных средств измерения расстояний, делались давно. Так, в 1987 г. в предприятия и структуры Главного управления геодезии и картографии СССР были разосланы изменения и дополнения к инструкции [8] (письмо №1-1075 от 11.11.1987 г.). Применительно к теодолитным ходам эти изменения заключались в следующем. При использовании для измерения сторон теодолитного хода светодальномеров и электронных тахеометров предельные длины сторон не устанавливаются, а количество сторон в ходе не должно превышать величин, представленных в табл. 4.

Таблица 4

Предельно допустимое количество сторон в теодолитном ходе

Масштаб топографического плана	Предельно допустимое количество сторон в ходе при съемке в	
	открытых районах	закрытых районах
1:5000	50	100
1:2000	50	100
1:1000	40	80
1:500	20	20

При установлении указанных в табл. 4 допусков разработчики изменений к инструкции исходили из точности измерения линий $m_{S} = 5$ см, углов – $m_{\beta} = 30''$. Заметим, что приведенные значения предельного количества сторон в ходе полностью вошли в свод правил [7]. Увеличение предельных длин теодолитных хо-

дов, несмотря на применение светодальномеров, никак не оговаривалось. Эта недосказанность была устранена Приказом №10 Комитета РФ по земельным ресурсам и землеустройству от 09.02.1994 г. Со ссылкой на упомянутое письмо ГУГК СССР в приказе указывалось, что при использовании для измерения линий светодальномеров и электронных тахеометров предельные длины теодолитных ходов между исходными геодезическими пунктами не устанавливаются.

В своде правил [7] попытались найти компромиссное решение: сохранить предельное количество сторон в теодолитных ходах, и при этом ограничить длину ходов. По результатам наших расчетов ограничения длины теодолитного хода для масштабов 1:500 и 1:1000, принятые сводом правил [7] 1,2 км и 2,5 км соответственно (таблица 1), выглядят необоснованно жесткими. Считаем, что предельная длина теодолитного хода, являющегося геодезическим обоснованием съемки масштаба 1:500, может быть увеличена в до 3,6 км. Для съемок масштаба 1:1000 предельная длина теодолитного хода может быть доведена до 4–5 км, что подтверждается исследованиями [10].

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Съёмочное обоснование для проведения тахеометрической съемки местности крупных масштабов оптимально создавать комбинированным методом – сочетанием спутниковых определений и проложением теодолитных ходов. При изысканиях протяженных линейных объектов целесообразно координировать спутниковыми приемниками парные пункты (через 3–5 км), между которыми прокладывать теодолитные ходы.

2. Рекомендуются увеличить допустимую длину теодолитных ходов, установленную сводом правил [7]. Для создания геодезического обоснования съемок масштаба 1:500 следует принять предельную длину хода 3,6 км, сохранив при этом допустимое количество сторон в ходе не более 20.

3. Оптимальная длина стороны теодолитного хода составляет 200 м. В этом случае центрирование тахеометра над точками хода допускается производить с ошибкой до 2 мм, а отражателя – до 6 мм. При длинах сторон хода 40–100 м требуется максимально точно центрировать прибор над точкой, а при измерении горизонтальных углов выполнять визирование на шпильки.

Анализ требований нормативных документов и составление предложений по их улучшению выполняется разными исследователями [11–13]. Остается надеяться, что при обновлении сводов правил и инструкций эти предложения будут учтены.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алтынцев М. А., Алтынцева М. А. Выбор методики составления топографических планов нефтегазовых объектов в зависимости от метода съёмки // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 447–463.
2. Середович В. А., Алтынцев М. А. Применение данных мобильного лазерного сканирования для создания топографических планов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Между-

нар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 3. – С. 96–100.

3. Войтенко А. В., Зотов Р. В., Столбов Ю. В. Опыт создания современной геодезической основы и съемочного обоснования для крупномасштабной съемки городской территории // Омский научный вестник. – 2012. – № 2 (114). – С. 227–232.

4. Гаврова В. М., Бороздина Н. О. Использование современных методов и средств при проведении топографических работ на территории кустовых площадок // Интерэкспо Гео-Сибирь-2022. XVIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. научно-технологич. конф. студентов и молодых ученых «Молодежь. Инновации. Технологии» сб. материалов в 8 т. (Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. Т 7, № 1. – С. 11–19.

5. Степанов Г. С. Опыт проектирования и создания планово-высотной опорной сети для полосных съемок в горных условиях // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2003. – № 11. – С. 19–23.

6. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS : ГКИНП (ОНТА) - 02-262-02. – Москва : ЦНИИГАиК, 2002. – 124 с.

7. СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – М. : Минстрой России, 2017. – 79 с.

8. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500 / Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. – М.: Недра, 1982. – 160 с.

9. Топогеодезическая подготовка ракетных войск и артиллерии : учеб. пособие для офицеров. ДСП. – М. : Воениздат, 1966. – 260 с.

10. Карев П. А. Об основных параметрах полигонометрических ходов при межевании и инвентаризации земель разных градаций // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 2, ч. 1. – С. 210–212.

11. Никонов А. В. Проблема актуализации СП 126.13330.2017 «Геодезические работы в строительстве» // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80, № 4. – С. 9–19. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-946-4-9-19

12. Залуцкий В. Т. Анализ требований к точности инженерно-топографических планов при проведении инженерно-геодезических изысканий // Инженерные изыскания. – 2021. – Т. XV, № 5–6. – С. 34–41. DOI: 10.25296/1997-8650-2021-15-5-6-34-41.

13. Ruziev A. S. Some theoretical researches for improving the current regulatory requirements for large-scale topographical surveying // Science and World. – 2017. – № 7-1 (47). – С. 72–75.

© А. В. Никонов, А. В. Галлер, 2023