

ГЕОДЕЗИЯ И КАДАСТР

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНЕЦЕНТРЕННОСТИ АЛИДАДЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ

Доцент, кандидат техн. наук **Ч.Н. Желтко**, ст. преподаватель **Д.А. Гура**,
ассистент **М.А. Пастухов**, ассистент **Г.Г. Шевченко**
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар
gda-kuban@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных измерений, свидетельствующих о наличии упругих деформаций подставки тахеометра, вызванных неуравновешенностью подвижной части прибора. Деформации приводят к погрешностям измерений горизонтальных углов.

Ключевые слова: тахеометр, зеркало, упругие деформации, графики уклонений

Abstract. The results of experimental measurements, which indicate the presence of elastic strain in the base of the total station, caused by the imbalance of the movable part of the instrument. Deformations lead to errors in measurements of horizontal angles.

Keywords. total station, mirror, elastic deformation, deviation graphics

У многих теодолитов и тахеометров имеет место неуравновешенность алидады горизонтального круга, вызванная несовпадением центра тяжести алидады с осью вращения прибора. В результате при вращении алидады на неподвижную часть прибора действуют переменные моменты силы, которые вызывают упругие деформации.

Приведенные в некоторых статьях [1–4] результаты исследований угломерных погрешностей разных гармоник горизонтального круга тахеометра и предположения, что часть из них является следствием упругих деформаций, вызывает у некоторых специалистов сомнения. В [5] приведены выполненные много лет назад исследования гирокомпасов 15Ш29 и оптических теодолитов ОТ-02М и Т2, которые свидетельствуют о наличии погрешностей, вызванных упругими деформациями, но доказательств наличия таких погрешностей у современных тахеометров, возможно, недостаточно. В связи с этим была разработана методика дополнительных исследований.

В методике предусмотрено использование устройства с двумя оптическими зеркалами, жёстко связанными между собой, расположенными вертикально, и угол между

которыми равен 90° . Устройство закрепляется на неподвижной части тахеометра, например, ниже алидады горизонтального круга, но выше подставки. При вращении алидады исследуемого тахеометра устройство должно быть неподвижным, если нет упругих деформаций. При их наличии устройство с зеркалами может испытывать повороты как вокруг вертикальной оси (азимутальные повороты), так и вокруг горизонтальной оси (наклоны прибора).

Возможные повороты зеркал фиксируются двумя тахеометрами (измерительными), в зрительные трубы которых видны через зеркала визирные цели, закреплённые на стене помещения (рис. 1). При исследованиях делают наведения тахеометрами на визирные цели при разных положениях алидады исследуемого тахеометра, снимают отсчёты, вычисляют уклонения отсчётов от среднего, которые и будут являться функциями погрешностей, вызванных упругими деформациями. При этом в уклонениях, кроме полезного результата, будут также содержаться погрешности наведения на визирные цели и отсчётов по кругам. Это обстоятельство снижает точность предлагаемого исследования. Однако можно значительно

уменьшить влияние указанных погрешностей исследования двумя путями.

Во-первых, нужно разместить измерительный тахеометр и визирную цель относительно зеркала так, чтобы коэффициент

$$k_1 = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\alpha}, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ — изменение отсчёта по горизонтальному или вертикальному кругу при небольшом повороте $\Delta\alpha$ зеркала вокруг соответственно вертикальной или горизонтальной (совпадающей с плоскостью зеркала) осей был максимальным.

Выведены формулы:

для отсчётов по горизонтальному кругу

$$k_1 = \frac{2b}{a+b}; \quad (2)$$

для отсчётов по вертикальному кругу

$$k_1 = \frac{2b \cos \beta}{a+b}, \quad (3)$$

где a, b — расстояния от зеркала до тахеометра и визирной цели соответственно; β — горизонтальный угол между перпендикуляром к зеркалу и визирным лучом от тахеометра до зеркала.

Из формулы (3) видно, что коэффициент k_1 при $b \gg a$ и $\beta \approx 0$ может достигать 2. Это означает, что практически в два раза можно повысить точность экспериментальных измерений за счёт того, что, например, при повороте зеркала на $1''$, отсчёт по кругу измерительного тахеометра изменяется на $2''$.

Во-вторых, нужно измерить горизонтальную составляющую момента силы, вызванного внецентренностью алидады в штатном режиме работы прибора, и дополнительно закрепить в нужном месте алидады груз, повышающий в несколько раз штатный момент силы. При этом нужно измерить или рассчитать коэффициент

$$k_2 = \frac{M}{M_0}, \quad (4)$$

где M и M_0 — моменты силы, вызванные внецентренностью алидады, с дополнительным грузом и без него соответственно (оба вектора моментов горизонтальны и должны совпадать по направлению).

Авторами разработан способ, позволяющий точно измерять горизонтальную состав-

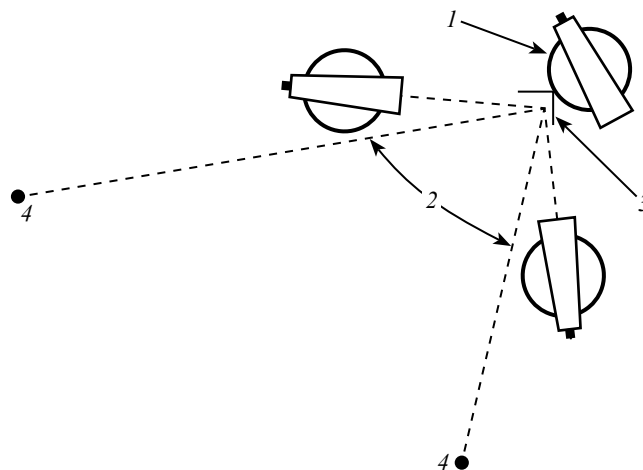


Рис. 1. Схема размещения приборов:

1 — исследуемый тахеометр; 2 — измерительные тахеометры; 3 — зеркало; 4 — визирные цели

ляющую вектора момента силы M_0 , создаваемую внецентренностью алидады, не разбирая прибор. Используя предлагаемый способ, рассчитывается, подбирается и закрепляется на алидаде дополнительный груз так, чтобы коэффициент k_2 был в диапазоне от 2 до 5. При этом не без основания предполагается, что возможные упругие деформации деталей тахеометра пропорциональны моменту силы.

В результате использования двух упомянутых подходов измеренные колебания отсчётов по кругам за счёт упругих деформаций будут усиливаться в $k_1 k_2$ раз, что эквивалентно уменьшению вредных погрешностей исследования в это число раз.

Исследования рекомендуется делать сразу по обоим кругам: горизонтальному и вертикальному. Для этого наводят на визирную цель перекрестием сетки нитей.

При исследованиях тахеометра на штативе с устройством, закреплённым выше подставки, невозможно установить в каком месте прибора или штатива имеют место деформации. С целью разрешения этой неопределённости подобные исследования нужно выполнить и для другого положения устройства с двумя зеркалами — между подставкой и головкой штатива. Затем, вычтя из первого исследования второе, получим деформации деталей только прибора. В них будут отсутствовать деформации штатива.

Одновременные измерения двумя тахеометрами позволяют не только повысить ещё в $\sqrt{2}$ раз точность исследования. Анализ сдви-

га фазы обеих кривых для двух измерительных тахеометров позволяет повысить достоверность результата, если теория согласуется с результатом измерений. Так можно показать, что для азимутальных деформаций фазы обеих кривых для обоих измерительных тахеометров должны совпадать. А для деформаций вокруг горизонтальной оси фазы должны отличаться на 90° за счёт угла между двумя зеркалами в 90° .

Существенно для исследований, чтобы визирные оси измерительных тахеометров до зеркала и за ним (до визирной цели) были горизонтальны. Иначе большие деформации вокруг горизонтальной оси исказят и измеряемые горизонтальные направления. Здесь применима известная формула погрешности ΔA горизонтального направления, зависящая от наклона вертикальной оси прибора α в поперечном направлении и угла наклона визирной оси v :

$$\Delta A = \alpha \operatorname{tg} v. \quad (5)$$

При возможных значениях наклона α прибора из-за неуровненности алидады в $30''$ и негоризонтальности визирной оси в 1° получим $\Delta A = 0,5''$, что можно считать допустимым. Тем более, что и эта погрешность в конечном результате тоже уменьшается в $k_1 k_2$ раз. Поэтому можно установить допуски на негоризонтальность визирной оси измерительного тахеометра в 1° , а не вертикальность зеркала $0,5^\circ$.

Для каждого измерительного тахеометра нужно определить коэффициент k_1 . Для этого нужно измерить расстояния a , b , угол β и подставить их в формулы (2) и (3). Непосредственно измерить расстояние b , а особенно угол β затруднительно, поэтому предлагается простой способ измерения нужных элементов. Непосредственно измерительным тахеометром измеряют расстояния до зеркала a , визирной цели c и угол между ними γ .

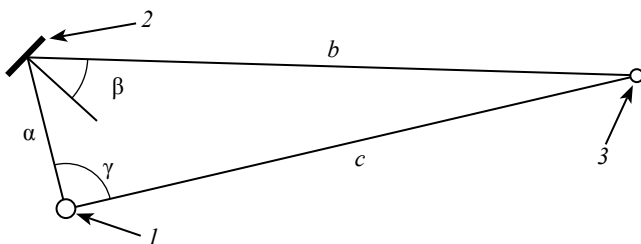


Рис. 2. Определение коэффициента k_1 :

1 — измерительный тахеометр; 2 — зеркало;
3 — визирная цель

Из рис. 2 вытекают нужные формулы:

$$b = \sqrt{a^2 + c^2 - 2ac \cos \gamma}; \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{c \sin \gamma}{b} \right). \quad (7)$$

Для контроля можно воспользоваться формулой

$$\beta = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \right). \quad (8)$$

Сами измерения просты, но их обработка громоздка. Полезно составить программу вычисления коэффициентов k_1 по трём измеренным элементам a , c и γ .

Для исследований был взят один электронный тахеометр с заметной неуровненностью алидады. Измерительными приборами служили два электронных тахеометра Leica двухсекундной точности. Далее приведём результаты только для одного тахеометра, потому что для другого тахеометра результаты похожи. С целью получения максимального коэффициента k_1 один из тахеометров устанавливался на небольшом удалении (1,8 м) от исследуемого тахеометра. Расстояние до визирной цели составило 20,2 м. Угол β был минимальным и составлял около 5° . Коэффициент k_1 для этой схемы составил 1,84.

Измерения выполнялись для трех вариантов с разными моментами силы, приводящими к разной неуровненности алидады:

1) штатный вариант, в котором величина неуровненности составляет 0,27 Нм;

2) вариант с нулевым моментом силы, в котором дополнительным грузом массой 260 г на расстоянии от оси прибора в 10 см уравновешивалась алидада;

3) вариант, в котором этим же дополнительным грузом в 260 г с другой стороны прибора на расстоянии 13 см создавался дополнительный момент силы, равный 0,34 Нм, в результате чего общий момент силы составил 0,61 Нм.

Отсюда получим коэффициент $k_2 = 2,26$.

Измерения в указанных трёх вариантах выполнялись для двух схем измерений:

устройство с зеркалом закреплялось выше подставки, но ниже алидады (зеркало на подставке);

устройство с зеркалом закреплялось между подставкой и головкой штатива (зеркало на штативе).

В каждом варианте выполнялось два приёма измерений. В одном приёме алидада исследуемого тахеометра поворачивалась от 0 до 360° через 30° (всего 13 положений). Для каждого положения измерительными тахеометрами выполнялись наведения перекрестием сетки нитей через зеркало на светящуюся визирную цель диаметром менее 0,5 мм и в запоминающее устройство приборов записывались отсчёты по горизонтальному и вертикальному кругам.

Два приёма измерений делалось по следующим соображениям. Известно, что при повороте алидады на 360° смазка в осевой системе перемещается на 180°. Следовательно, желательно сделать ещё один приём, чтобы распределение смазки вернулось в исходное состояние. Два независимых графика на одном рисунке, соответствующие двум приёмам измерений, дают наглядное представление о точности измерений: чем лучше оба графика совпадают, тем выше точность измерений.

В этих исследованиях применён метод распределения погрешности за незамыкание горизонта на основе известного метода точных измерений горизонтальных направлений способом круговых приёмов, когда незамыкание горизонта равномерно распределяется на все направления. В данных исследованиях 13-е измерение делается на такой же установке горизонтального круга, как и первое, поэтому в каждый отсчёт измерительным тахеометром можно ввести такие поправки, чтобы упомянутые два отсчёта совпали. Формула для исправленного отсчёта A_i будет иметь вид

$$A_i = A'_i + (i-1) \frac{A'_1 - A'_{13}}{12}, \quad (9)$$

где A'_i — отсчёт по горизонтальному или вертикальному кругу; i — номер измерения в приёме ($i=1 \div 13$).

В этом случае отклонения v_i нужно вычислять как отклонения от среднего $A_{\text{ср}}$, полученного по 12-ти измерениям (а не 13)

$$v_i = A_i - A_{\text{ср}}. \quad (10)$$

Результаты исследований для одного тахеометра показаны на рис. 3 (все отклонения уменьшены в k_1 раз). Для другого тахеометра результаты похожие.

Для варианта штатного режима в схеме размещения зеркала на подставке отклонения по горизонтальному кругу (ГК) близки к нулю (см. рис. 3, а), хотя и просматривается небольшой прогиб вниз в середине графиков. Для вертикального круга (ВК) имеем значительные колебания (см. рис. 3, ж) до 26" (амплитуда 13"). В схеме размещения зеркала на штативе заметны в отклонениях по ГК небольшие отклонения вверх в середине графика (см. рис. 3, в). Для ВК (см. рис. 3, и) имеем колебания до 16". В разностях отклонений, что эквивалентно влиянию деформаций только прибора без штатива, на графиках для ГК (см. рис. 3, д) тоже заметно искривление вниз до 5". Разности отклонений по ВК колеблются до 18" (см. рис. 3, л). Разности вычислены по средним значениям отклонений на предыдущих графиках.

Для варианта с нулевым моментом силы результаты вполне ожидаемы, поэтому графики не приведены. Графики для ГК и ВК колеблются вблизи нуля в основном за счёт погрешностей измерений.

Для варианта с увеличенным моментом силы в схеме размещения зеркала на подставке отклонения по ГК (см. рис. 3, б) имеют колебания около 6". Для отклонений по ВК (см. рис. 3, з) колебания достигают 70". В схеме размещения зеркала на штативе отклонения по ГК (см. рис. 3, г) имеют еле заметную синусоиду. Для отклонений по ВК (см. рис. 3, к) колебания около 40". Здесь уместно заметить, что отклонения по ВК при размещении зеркала на штативе близки к отклонениям при размещении зеркала на подставке и составляют соответственно 16" (см. рис. 3, и) и 18" (см. рис. 3, л). Отсюда можно заключить, что упругие деформации в подставке прибора и штативе почти одинаковые.

Наиболее значимый результат приведен на графике разностей отклонений (см. рис. 3, е), где видны азимутальные деформации, колебания которых составляют 10". Здесь пока не учитывался коэффициент $k_2=2,26$. С его учётом колебания составят 4". Это величина азимутальных упругих колебаний подставки (без штатива) в штатном режиме работы прибора. Непосредственные измерения влияния упругих деформаций без увеличения момента силы даёт в среднем (см. рис. 3, д) величину, близ-

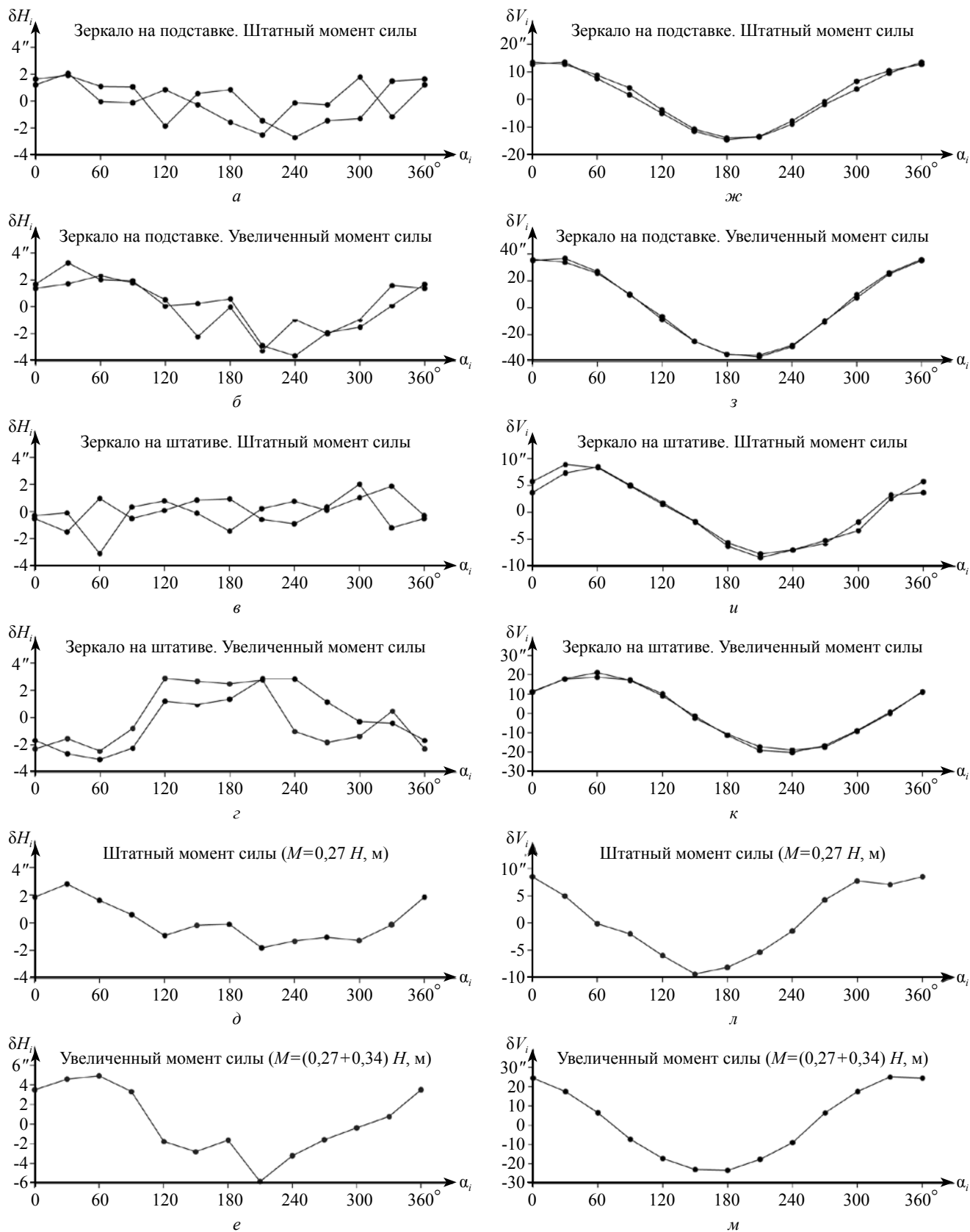


Рис. 3. Графики влияния упругих деформаций:

$a, б, в, г,$ — уклонения по горизонтальному кругу; $д, е,$ — разности уклонений по горизонтальному кругу;
 $ж, з, и, к,$ — уклонения по вертикальному кругу; $л, м,$ — разности уклонений по вертикальному кругу

кую к приведенной выше и равную около 5". Причём и фазы этих двух графиков близки между собой (минимум в среднем приходится на отсчёт 210°).

Величина полученной азимутальной деформации небольшая, но это упругие деформации, которые у других приборов могут быть и больше: ведь для эксперимента произвольно взят один прибор. Вместе с тем выявленные азимутальные упругие деформации относятся только к той части подставки, на которой закреплено устройство с зеркалом. Однако дополнительно могут иметь место азимутальные деформации и других частей прибора, расположенных в конструктивной цепи прибора от подставки до детали, несущий кодовый горизонтальный круг. Разработка методики и производство этих исследований запланировано на будущее.

Авторами статьи были измерены моменты сил, вызванных неуравновешенностью алидады, для приборов типа: Leica; Nikon; Sokkia; Spectra; Stonex; Topcon; Trimble. Моменты силы лежат в диапазоне от 0,07 до 0,27 нм. Для одного из них выполненные ранее подобные исследования показали величину колебаний наклона подставки (вместе со штативом) до 80".

Таким образом, проведенный эксперимент показал с высокой степенью достоверности, что из-за неуравновешенности алидады имеют

место упругие повороты подставки тахеометра не только вокруг горизонтальной оси в диапазоне порядка 30" и более, которые практически не оказывают влияния на точность измерения вертикальных углов, но и азимутальные повороты, которые, хотя и на порядок меньше, прямо приводят к дополнительным погрешностям измерения горизонтальных углов. Поэтому можно рекомендовать производителям тахеометров делать уравновешенную алидаду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гура Д.А., Желтко Ч.Н., Аветисян Г.Г. Об исследованиях угломерных ошибок горизонтального круга электронных тахеометров разложением в ряды Фурье // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2011. – № 4. – С. 3–6.
2. Гура Д.А., Аветисян Г.Г., Желтко Ч.Н. Исследования упругих деформаций электронных тахеометров // Геодезия и картография. – 2011. – № 5. – С. 10–12.
3. Желтко Ч.Н., Гура Д.А., Шевченко Г.Г., Пастухов М.А. История проблемы исследования погрешностей измерений углоизмерительных приборов // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2013. – № 5. – С. 43–45.
4. Гура Д.А., Аветисян Г.Г., Желтко С.С. Об исследованиях угломерных ошибок электронных тахеометров // Геодезия и картография. – 2011. – № 4. – С. 16–18.
5. Желтко Ч.Н., Гура Д.А., Шевченко Г.Г., Бердзенишвили С.Г. Экспериментальные исследования погрешностей измерений горизонтальных углов электронными тахеометрами / Метрология: приложение к журналу Измерительная техника. – 2014. – № 2. – С. 17–20.

*Принята к печати 9 октября 2015 г.
Рекомендована кафедрой кадастра
и геоинженерии КГТУ*

ЦИФРОВЫЕ ИНКЛИНОМЕТРЫ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ

Аспирант Бернд Хиллер

*Московский государственный университет геодезии и картографии
bhiller@leica-gfk.ru*

Аннотация. Рассматривается роль и место высокоточных цифровых инклинометров для автоматизации процесса мониторинга деформаций зданий и инженерных сооружений и дается краткий обзор международного и отечественного опыта использования инклинометров для мониторинга деформаций.

Ключевые слова: цифровые инклинометры, автоматизированный мониторинг деформаций

Abstract. The paper describes the role and position of high precision digital inclinometers within the automation process of deformation monitoring for buildings and engineering structures and gives a short overview about international and national experiences in using inclinometers for deformation monitoring.

Keywords: digital inclinometers, automated deformation monitoring

Современное научно-техническое и экономическое развитие сопровождается строительством и эксплуатацией огромных по масштабам инженерно-технических сооружений,

например, таких как высотные здания (400 м и выше), крупнейшие плотины, гигантские мосты и сверхдлинные тоннели, здания и сооружения со сложными конструкциями и т.п.