

УДК 622.831.1

Ефремов Евгений Юрьевич

научный сотрудник,
лаборатория сдвижения горных пород
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка 58
e-mail: efremov-eu@mail.ru

**ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
ДЕФОРМАЦИИ СТЕНОК
ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК
ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМ
ТАХЕОМЕТРОМ**

Аннотация:

Рассмотрены погрешности измерений при определении деформаций массива горных пород вокруг выработки. За перемещения массива принимаются проекции вектора смещения деформационных марок, заложенных в поперечном сечении горной выработки на плоскость сечения. Деформационные марки представляют собой забивные анкеры-клины, заложенные по периметру сечения в стенках и кровле горизонтальной горной выработки вблизи забоя. Измерения осуществляются с помощью высокоточного тахеометра. Произведена теоретическая оценка погрешности положения деформационных марок в зависимости от положения марки относительно инструмента на основе паспортных характеристик высокоточного электронно-оптического тахеометра со среднеквадратичной ошибкой измерений одна угловая секунда. Полученные значения среднеквадратической погрешности определения положения в плоскости сечения лежат в диапазоне 0,5 – 0,85 мм.

Для проверки полученных теоретических оценок на практике были выполнены измерения конвергенции выработок на действующем предприятии. Натурные измерения, произведенные в крепких породах, зафиксировали смещения деформационных марок 0 – 4 мм. Оценка погрешностей проведенных измерений по формуле Бесселя показывает, что среднеквадратическая ошибка положения марок при измерениях двумя полными приемами составляет около 0,4 мм. Показано, что полученная относительная ошибка определения деформации составляет 1/10000. Полученные данные свидетельствуют, что фактические ошибки измерений высокоточными электронно-оптическими тахеометрами в шахтных условиях при соблюдении техники измерений близки к теоретическим. Это делает применение данного метода измерений пригодным для мониторинга изменений поля напряжений горного массива вокруг выработок и для определения конвергенции выработок при уходе забоя для определения характеристик естественного поля напряжений в нетронутым массиве.

Ключевые слова: тахеометр, напряженно-деформированное состояние, конвергенция стенок выработок, среднеквадратичная погрешность, оценка погрешностей измерений

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.029

Efremov Evgeny Yu.

Research Worker,
Laboratory of displacement of rocks,
Institute of Mining UB RAS,
620075, Ekaterinburg,
Mamina-Sibiryaka Str. 58
email: efremov-eu@mail.ru

**MEASUREMENT ACCURACY
WHEN MEASURING THE DEFORMATION
OF MINE WALLS BY TOTAL STATION**

Abstract:

The paper has described the measurement accuracy when measuring the deformations of rock mass around mines. The projections of the displacement vector for displacing the deformation control benchmarks embedded in the cross section of the mine on the section plane are taken to be rock mass movements. The deformation control benchmarks are drive wedge anchors embedded along the perimeter of the section in the walls and roof of the horizontal mine near the mine face. Measurements are carried out using a high-precision total station. The accuracy in position of the deformation control benchmarks depending on the position of the benchmark relative to the instrument has been theoretically estimated on the basis of the passport characteristics of a high-precision total station with a root-mean-square measurement error being equal to one angular second. The obtained values of the root-mean-square error in determining the position in the section plane fall in the range from 0.5 to 0.85 mm.

To verify the theoretical estimates obtained in practice, we have measured the convergence of mine workings at the operating enterprise. Field measurements made in hard rocks have recorded displacements of the deformation control benchmarks 0–4 mm. The estimation of the accuracy for the measurements carried out using the Bessel formula shows that the root-mean-square error of the position of the benchmarks in the measurements with two complete actions is about 0.4 mm. It is shown that the obtained relative error in determining the deformation is 1/10000. The data obtained indicate that the actual measurement errors of high-precision total stations under mine conditions, while observing the measurement technique are close to theoretical values. This makes the application of this measurement method suitable for monitoring the changes in the stress field of rock mass around the mines and for determining the convergence of mines during the mine face advance to determine the characteristics of the natural stress field in virgin rock.

Key words: total station, stress-deformed state, convergence of mine walls, root-mean-square error, estimation of measurement accuracy

Введение

Определение деформаций поперечного сечения горных выработок применяется при решении обратных задач для исследований параметров напряженного состояния приконтурного массива. На текущий момент в практике геомеханики широко распространены и хорошо разработанными методами определения напряженно-деформированного состояния массива являются методы частичной разгрузки, такие как скважинные методы разгрузки, методы разгрузки щелями и др. [1]. Все они используют источники разгрузки (скважины, щели) небольшого размера, не превышающие десятков сантиметров.

Определение напряженного состояния геологической среды с использованием в качестве источника разгрузки горной выработки является перспективным направлением, так как, в соответствии с принципом Сен-Венана, за счет масштабного эффекта позволяет изучать напряженно-деформированное состояние значительно большего объема массива по сравнению с распространенными методами [2, 3, 4]. При определении конвергенции стен поперечного сечения выработок деформации стен ассоциируются со смещением деформационных марок, заложенных равномерно по периметру сечения (рис. 1). На текущий момент распространен и описан способ определения деформаций в горных выработках с помощью повторного измерения длин маркшейдерской рулеткой с нониусом и другими подобными методами [5, 6]. В настоящее время существуют работы, в которых определение конвергенции поперечных сечений выработок осуществляется с применением электронно-оптических тахеометров, однако вопросам погрешностей измерений в них внимания не уделяется [7].



Рис. 1 – Размещение деформационных марок в сечении выработки

Преимуществами применения тахеометров по сравнению с измерениями рулеткой и подобными способами являются:

1. Возможность закладки большого числа просто устроенных деформационных марок.
2. Проведение измерений в труднодоступных местах [8].

Согласно информации производителей, среднеквадратическая ошибка (СКО) измерения расстояний у современных приборов в безотражательном режиме составляет около 0,6 – 1,2 мм. Существуют работы, которые демонстрируют СКО измерений 0,54 мм на расстоянии 10 м для высокоточного тахеометра Sokkia net1200 в условиях, близких к идеальным [9]. Однако при выполнении измерений в горных выработках в условиях влажности, запыленности, влияния работающей в непосредственной близости техники и т.д. погрешность измерения может оказаться выше, чем в лабораторных условиях.

В данной статье рассматриваются погрешности определения положения деформационных марок при помощи электронно-оптического тахеометра.

Целью данной работы является теоретическое обоснование величины СКО определения положения деформационных марок с применением электронно-оптических тахеометров и сравнение ее с СКО определения марок, полученных при выполнении измерений в шахтных условиях.

Теоретическая оценка погрешности измерений

Оценка СКО определения производится в условной системе координат. Началом системы координат является точка геометрического центра сечения выработки. Ось X направлена вдоль оси выработки, в сторону удаления забоя. Ось Y лежит на пересечении горизонтальной плоскости и плоскости поперечного сечения выработки, дополняет систему до правосторонней. Ось Z направлена вверх.

Проекция векторов \bar{t}_{yz} перемещения деформационных марок на плоскость сечения – смещение массива (на рис. 2 изображено красным цветом).

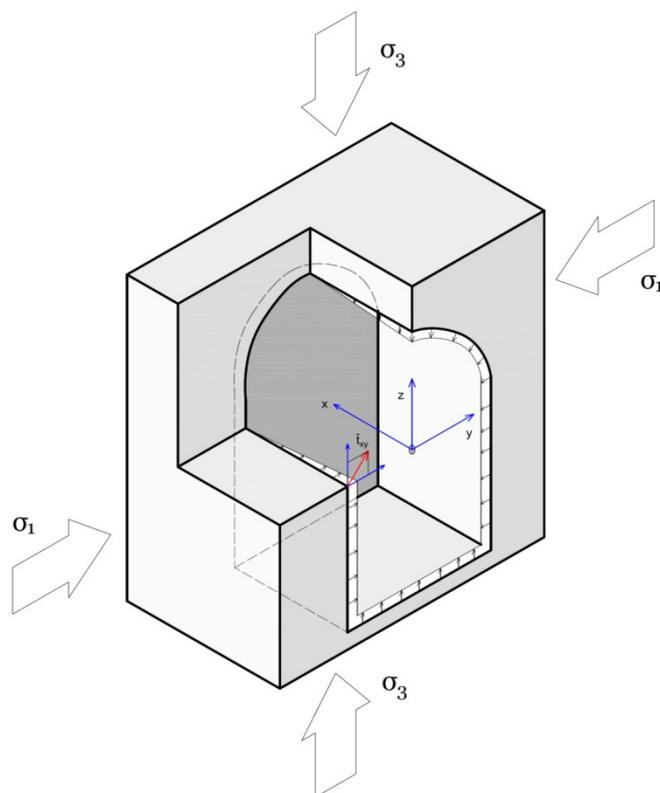


Рис. 2 – Схема деформирования поперечного сечения выработки

Положение каждой деформационной марки описывается тремя координатами в трехмерном пространстве. Исходными данными для определения координат являются параметры, измеряемые электронным тахеометром – горизонтальный и вертикальный углы (α, γ), и наклонное расстояние (S):

$$\begin{cases} Y = S \sin \gamma \cos \alpha; \\ X = S \sin \gamma \sin \alpha; \\ Z = S \cos \gamma. \end{cases} \quad (1)$$

Ошибки измеряемых параметров являются основными источниками погрешности положения марок. Таким образом, положение марки, определенное в ходе измерений, находится в центре фигуры, ограниченной величиной погрешностей измерения вертикального, горизонтального углов и наклонного расстояния между инструментом и измеряемой маркой (рис. 3).

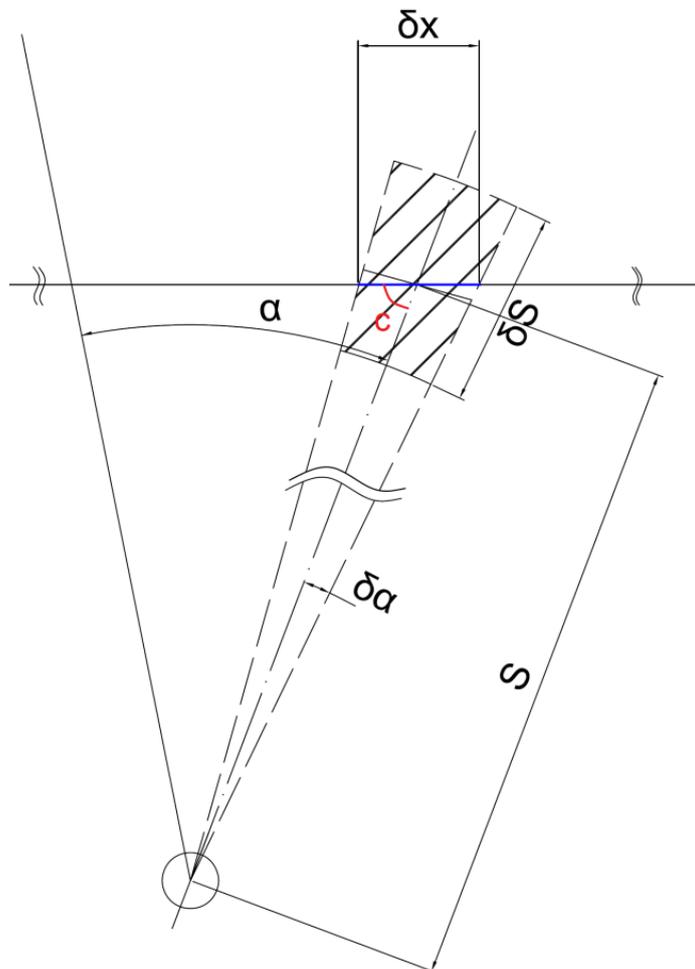


Рис. 3 – Погрешность определения положения деформационной марки:
 α – измеряемый горизонтальный угол; $\delta\alpha$ – ошибка горизонтального угла; S – расстояние;
 δS – ошибка расстояния; δx – ошибка измерения в плоскости сечения

В теории ошибок измерений СКО функции от некоррелированных аргументов определяется как квадратный корень из суммы квадратов произведений частных производных функции по каждому аргументу на СКО этих аргументов [10]:

$$m_u = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \cdot m_x\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \cdot m_y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial u}{\partial n} \cdot m_n\right)^2}. \quad (2)$$

Применяя это выражение для оценки погрешности положения деформационных марок от измеряемых электронно-оптическим тахеометром величин, в соответствии с (1) получаем:

$$\begin{aligned}
 M_x &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial S} \cdot m_s\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \gamma} \cdot \frac{m_\gamma}{\rho''}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha} \cdot \frac{m_\alpha}{\rho''}\right)^2}; \\
 M_y &= \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial S} \cdot m_s\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \gamma} \cdot \frac{m_\gamma}{\rho''}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \cdot \frac{m_\alpha}{\rho''}\right)^2}; \\
 M_z &= \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial S} \cdot m_s\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \gamma} \cdot \frac{m_\gamma}{\rho''}\right)^2},
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где M_x, M_y, M_z – среднеквадратическая ошибка определения положения марки вдоль соответствующей оси; $\frac{\partial x}{\partial S}, \frac{\partial x}{\partial \gamma}, \frac{\partial x}{\partial \alpha}, \frac{\partial y}{\partial S}, \frac{\partial y}{\partial \gamma}, \frac{\partial y}{\partial \alpha}, \frac{\partial z}{\partial S}, \frac{\partial z}{\partial \gamma}$ – частные производные функций координат по измеряемым параметрам: наклонному расстоянию, вертикальному и горизонтальному углу, соответственно; m_s, m_γ, m_α – ошибка измерения расстояния, вертикального и горизонтального углов; ρ'' – количество угловых секунд в одном радиане (~206265).

Среднеквадратическая ошибка измерения современными высокоточными приборами расстояний составляет 1 мм (на рис. 2 – δS), горизонтальных и вертикальных углов – 1 с (на рис. 2 – $\delta \alpha$). При определении конвергенции расстояние между инструментом и деформационной маркой составляет не более 5 – 6 м. На таких дистанциях влияние СКО измерения углов, согласно характеристикам приборов, не должно превышать 0,03 мм.

В табл. 1 на основе (3) оценено влияние расположения деформационной марки относительно прибора на СКО определения ее положения (в качестве погрешностей измерения приняты паспортные характеристики высокоточного инструмента Sokkia net 1200 – 1 мм, 1 с).

Таблица 1

Предварительная оценка среднеквадратической ошибки (СКО) определения положения деформационной марки

№ точки	S(накл), м	Y(верт), град	α(гор), град	m_s , м	m_γ , град	m_α , град	M_x , мм	M_y , мм	M_z , мм	M_{xyz} , мм	M_{yz} , мм	M_{xyz}/M_{yz}
1	4,050	110,0	325,0	0,001	0,00028	0,00028	0,770	0,539	0,342	1,000	0,638	1,6
2	4,051	97,5	325,0	0,001	0,00028	0,00028	0,812	0,569	0,131	1,000	0,583	1,7
3	4,134	85,0	325,0	0,001	0,00028	0,00028	0,816	0,571	0,087	1,000	0,578	1,7
4	4,209	72,5	325,0	0,001	0,00028	0,00028	0,781	0,547	0,301	1,000	0,624	1,6
5	4,132	60,0	342,5	0,001	0,00028	0,00028	0,826	0,260	0,500	1,000	0,564	1,8
6	4,140	60,0	0,0	0,001	0,00028	0,00028	0,866	0,000	0,500	1,000	0,500	2,0
7	4,279	72,5	17,5	0,001	0,00028	0,00028	0,910	0,287	0,301	1,000	0,416	2,4
8	4,287	85,0	35,0	0,001	0,00028	0,00028	0,816	0,571	0,087	1,000	0,578	1,7
9	4,372	97,5	35,0	0,001	0,00028	0,00028	0,812	0,569	0,131	1,000	0,583	1,7
10	4,244	110,0	35,0	0,001	0,00028	0,00028	0,770	0,539	0,342	1,000	0,638	1,6
11	4,162	122,5	35,0	0,001	0,00028	0,00028	0,691	0,484	0,537	1,000	0,723	1,4
12	4,165	135,0	35,0	0,001	0,00028	0,00028	0,579	0,406	0,707	1,000	0,815	1,2

Проведенные вычисления позволяют оценить влияние отдельных составляющих на погрешность определения положения. Из анализа ясно, что основной вклад в ошибку определения положения марки вносит измерение расстояний. Это влияние зависит от угла между лучом дальномера и искомой плоскостью сечения (на рис. 2 – с, помечен красным цветом).

Из табл. 1 видно, что СКО определения положения в трех измерениях (M_{xyz} , тонированный столбец) составляет от 1,6 до 2,0 СКО в плоскости сечения (M_{yz}).

Анализ влияния расположения марки относительно инструмента на погрешность определения положения показывает, что при данных паспортных характеристиках прибора СКО положения марки в плоскости сечения составляет от 0,42 до 0,82 мм.

Оптимальное расположение инструмента для минимизации погрешностей измерений в данном случае зависит от двух переменных – угла, под которым визирный луч попадает на деформационную марку, и расстояния между инструментом и деформационной маркой.

Анализ произведенных измерений конвергенции стен и кровли в забое горизонтальной выработки проводился по формуле Бесселя [11]:

$$m_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n-1}}. \quad (4)$$

Ошибка определялась вдоль каждой из осей в отдельности, а также определялись полная ошибка и ошибка в плоскости сечения.

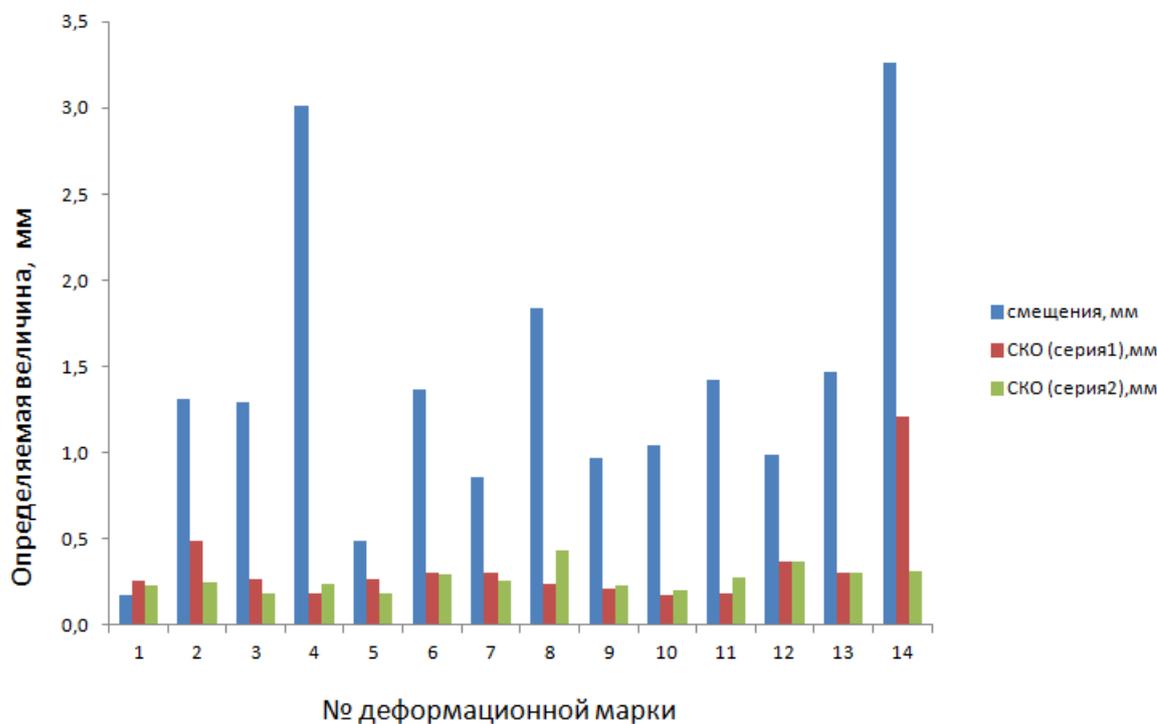


Рис. 4 – Сопоставление смещений деформационных марок и среднеквадратической погрешности определения положения

Для проверки теоретических оценок проведены экспериментальные работы, включающие 74 определения положения деформационных марок (2 серии измерений, проведенные в трех разных сечениях, по 11 – 14 деформационных марок в каждом). Анализ измерений показал, что при измерениях, выполняемых двумя полными приемами (т.е. на каждую деформационную марку в течение одной серии измерений приходится

4 измерения), среднеквадратическая ошибка измерений в плоскости сечения (m_{yz}) составляет 0,2 – 0,5 мм, в среднем 0,35 мм. Величина определяемых смещений колеблется в пределах 0 – 4 мм. В общем случае она зависит от физико-механических свойств породы. Данные измерения производились в крепких породах (коэффициент крепости Протодьяконова $f > 10$), в связи с этим зафиксированные значения невелики, однако существенно превышают погрешности измерений. Пример сопоставления СКО измерений и определенных смещений для одного из сечений приведен на рис. 4.

По сравнению с теоретическими среднеквадратическими ошибками, рассчитанными на основе паспортных характеристик реальные погрешности несколько меньше при измерении расстояний и немного превышают теоретические при измерении углов. Размер поперечного сечения выработки приблизительно 4 м, таким образом, относительная ошибка измерения смещения составляет около 1/10000.

Вывод

Анализ погрешностей измерений показал, что данный метод позволяет со среднеквадратичной ошибкой до 0,4 мм измерять положение деформационных марок в поперечном сечении выработок. Данная погрешность оказывается несколько меньше ожидаемой, оцениваемой на уровне 0,5 – 0,8 мм. Определяемые деформации превышают погрешности измерений в 2 – 10 раз, что позволяет достоверно определять конвергенцию стенок выработки. При соблюдении техники производства измерений шахтные условия не оказывают значительного влияния на погрешности измерений.

Следует отметить, что в практическом применении на метод определения поперечных деформаций накладываются ограничения, обусловленные организацией горнопроходческих работ на предприятии (ориентация выработок, скорость проходки, рабочий цикл проходки и др.)

Применение электронно-оптических систем позволяет определять поперечную деформацию стен горных выработок с относительной ошибкой 1/10000. Определенная таким образом конвергенция стен и кровли может применяться при мониторинге устойчивости горных выработок. Другим перспективным применением данного метода является определение деформаций поперечного сечения выработок при уходке забоя для определения параметров естественного поля напряжений в нетронутым массиве горных пород.

Литература

1. Кораблев А.А. Современные методы и приборы для изучения напряженного состояния массива горных пород / А.А. Кораблев. – М.: Наука, 1969. – 128 с.
2. Сашурин А.Д. Совершенствование методики натурных замеров напряженно-деформированного состояния больших участков горного массива / А.Д. Сашурин, А.Е. Балек // Вестник ПНИПУ. Геология и нефтегазовое дело. – 2014. – № 11. – С. 105 - 120.
3. Ефремов Е.Ю. Метод определения напряжений на протяженных участках массива горных пород / Е.Ю. Ефремов, О.Д. Желтышева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 34 – 39.
4. Балек А.Е. Обоснование геомеханических условий подземной разработки алмазного месторождения «трубка Удачная» / А.Е. Балек, Е.Ю. Ефремов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 5. – С. 39 – 45.
5. Синкевич Н.И. Исследование деформаций контура горизонтальных выработок при их проходке на больших базах / Н.И. Синкевич // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 5. – С. 326 – 328.
6. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология / А. В. Зубков. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. – 335 с.

7. V.A. Kontogianni, S.C. Stiros. Induced deformation during tunnel excavation: Evidence from geodetic monitoring // *Engineering Geology*. – 2005. - № 79. - P. 115 – 126.

8. Селин К.В. Контроль смещений поверхности обделки строящейся станции «Торговый центр» Челябинского метрополитена методом тригонометрического нивелирования / К.В. Селин, А.Б. Шмонин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – № 7. – С. 158 – 163.

9. Каткова Д.Ю. Исследование по применению высокоточного электронного тахеометра Sokkia net 1200 при съемке пространственного положения строительных конструкций зданий и сооружений / Д.Ю. Каткова // *Вестник ЮУрГУ*. – 2011. – № 35. – С. 44 – 47.

10. Гордеев В.А. Основы теории ошибок измерений: учеб. пособие / В.А. Гордеев. – Екатеринбург: Изд. Урал. гос. горно-геол. акад., 2000. – 182 с.

11. Гудков В.М. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений: учебник для вузов / В.М. Гудков, А.В. Хлебников. – М.: Недра, 1990. – 335 с.