

УДК 528.063.1

## **РЕЗУЛЬТАТЫ АСТРОИЗМЕРЕНИЙ УКЛОНЕНИЙ ОТВЕСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ**

**М.М. Мурзабеков, В.Ф. Фатеев, А.В. Пругло, С.С. Равдин**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.*

*murzabekov@vniiftri.ru,*

*fateev@vniiftri.ru,*

*my@dinfo.ru,*

*wurf@yandex.ru*

*Используя измерения уклонений отвесной линии (УОЛ) с дискретностью несколько километров, локальную структуру ГПЗ можно восстановить с максимально высоким разрешением. Это можно сделать с использованием астроизмерителей УОЛ, которые обладают высокой оперативностью и точностью измерений по сравнению с другими методами определения УОЛ. В статье представлены разработанный метод измерений с астроизмерителем УОЛ и результаты его испытаний на различных географических точках в полевых условиях. Предложенный метод, в отличие от существующего традиционного метода, позволяет оценивать и учитывать калибровочные коэффициенты астроизмерителя в каждой серии измерений. К тому же новый метод не предъявляет требования к точности вращения телескопа вокруг оси в горизонтальной плоскости и жёсткости основания месторазмещения астроизмерителя. Результаты испытаний разработанного метода показали повышение оперативности и точности измерений: время измерений сокращается с 1,5 ч до 30 минут, среднее СКО не превышает 0,2".*

*Ключевые слова: уклонение отвесной линии, астроизмеритель, метод измерений, калибровочные коэффициенты.*

## **RESULTS OF ASTROMEASUREMENTS OF A PLUMB INCLINATIONS USING A NEW METHOD OF MEASUREMENTS**

**M.M. Murzabekov, V.F. Fateev, A.V. Pruglo, S.S. Ravdin**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region*

*murzabekov@vniiftri.ru,*

*fateev@vniiftri.ru,*

*my@dinfo.ru,*

*wurf@yandex.ru*

*Having organized the determination of deflection of vertical (DOV) with a resolution of several kilometers, the local structure of the EGF can be restored with the highest resolution. This can be done using digital zenith camera system (DZCS), which have high efficiency and accuracy of measurements in comparison with other methods of determining of DOV. The article presents the developed measurement technique with an DZCS and the results of its tests at various geographical points in the field. The proposed method, unlike the existing traditional method, allows one to evaluate and take into account the calibration coefficients of the DZCS in each series of observations. In addition, the new technique does not impose requirements on the accuracy of rotation*

of the telescope around the axis in the horizontal plane and the rigidity of the base of the DZCS. The test results of the developed technique showed an increase in the efficiency and accuracy of measurements: the measurement time is reduced from 1,5 hour to 30 minutes, the average standard deviation is reduced to 0,2".

*Key words:* deflection of vertical, digital zenith camera, observation method, calibration coefficients.

## Введение

Уклонение отвесной линии (УОЛ) используется для изучения фигуры Земли, уточнения модели геопотенциала, установления связи между астрономической и геодезической системами координат, высокоточного редуцирования геодезических измерений и решения других прикладных задач. На сегодняшний день астроизмерители, использующие астрономо-геодезический метод определения УОЛ, получили широкое распространение в силу высокой оперативности выполнения наблюдений и точности получаемых значений УОЛ.

Составляющие УОЛ можно найти разными способами.

1. При известных астрономических и геодезических координатах местоположения составляющие УОЛ вычисляются как [1]:

$$\begin{aligned}\xi &= \Phi - B; \\ \eta &= (\Lambda - L) \cdot \cos B,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\Phi$ ,  $\Lambda$  — астрономические широта и долгота;  $B$ ,  $L$  — геодезические широта и долгота.

Эта формула используется в традиционном методе измерений существующих астроизмерителей (см., например, [2]).

2. При известных компонентах  $g_x$ ,  $g_y$  вектора силы тяжести  $\mathbf{g}$  составляющие УОЛ находятся по следующим формулам [3]:

$$\xi = -\arcsin\left(\frac{g_x}{|\mathbf{g}|}\right), \quad \eta = -\arcsin\left(\frac{g_y}{|\mathbf{g}|}\right). \quad (2)$$

Знак «минус» означает, что значения УОЛ в сторону возрастания координат считаются отрицательными.

Нормируем вектор силы тяжести  $\mathbf{g}$  в виде  $\frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|} = \mathbf{n}$ . При этом единичный вектор  $\mathbf{n}$  выглядит следующим образом:

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ \sqrt{1 - n_x^2 - n_y^2} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $n_x = \frac{g_x}{|\mathbf{g}|}$ ,  $n_y = \frac{g_y}{|\mathbf{g}|}$ .

С учётом этого формула (2) примет вид:

$$\begin{aligned}\xi &= -\arcsin(n_x), \\ \eta &= -\arcsin(n_y).\end{aligned}\tag{4}$$

Таким образом, задача определения значений составляющих УОЛ сводится к вычислению компонент нормированного вектора  $\mathbf{n}$ .

### **Традиционный метод измерений существующих астроизмерителей**

Традиционный метод измерений УОЛ с помощью существующих астроизмерителей предполагает измерение при двух диаметральных положениях телескопа. При этом для применения традиционного метода измерений необходимо [2]:

- определить калибровочные коэффициенты астроизмерителя перед началом измерений, которые в дальнейшем используются как постоянные величины;
- осуществить поворот системы на  $180^\circ$  с погрешностью не хуже  $10''$ ;
- обеспечить жёсткость основания размещения астроизмерителя.

В связи с этим традиционный метод измерений обладает следующими недостатками:

- калибровочные коэффициенты астроизмерителя необходимо определять перед началом измерений в каждой точке. Время, затрачиваемое на этот процесс, составляет около 30 минут;
- калибровочные коэффициенты могут изменяться между сериями наблюдений, что вносит дополнительную погрешность в результаты наблюдений;
- разворот телескопа на  $180^\circ$  в горизонтальной плоскости с высокой точностью требует наличия высокоточных датчиков поворота, что усложняет конструкцию астроизмерителя;
- для обеспечения жёсткости горизонтального основания месторазмещения астроизмерителя необходимо использование специального основания (бетонного, металлического и др.).

### **Новый метод повышения точности и оперативности измерений УОЛ**

#### ***Анализ данных измерений и конструкции астроизмерителя***

В связи с недостатками традиционного метода измерений УОЛ предложен новый метод, который свободен от этих недостатков.

Основными составными элементами астроизмерителя являются: телескоп, ПЗС-камера, инклинометр и ГНСС-приёмник. Данными измерений с астроизмерителем в каждом положении телескопа являются: кадр звёздного неба;

геодезические координаты местоположения; время экспозиции кадра звёздного неба; текущий наклон телескопа по показаниям инклинометра; значение температуры, которое можно определить, например, по встроенному датчику температуры в инклинометре.

Для начала определим измеряемые, вычисляемые и неизвестные параметры, которые используются при наблюдениях с астроизмерителем.

1. При сборке астроизмерителя ПЗС-камера прикрепляется к телескопу снизу, а инклинометр прикрепляется непосредственно сбоку к трубе телескопа. При этом относительные угловые расположения плоскостей ПЗС-сенсора и инклинометра неизвестны. Для выполнения совместной обработки данных измерений с ПЗС-камеры и инклинометра необходимо определить углы взаимной ориентации между их приборными системами координат (СК). Взаимное расположение осей СК инклинометра и ПЗС-камеры можно характеризовать тремя углами Эйлера  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ . Три угла Эйлера однозначно определяют поворот одной СК относительно другой [1].
2. Инклинометр показывает текущий наклон телескопа относительно отвесной линии. При этом для выполнения измерений по двум перпендикулярным осям ОХ и ОУ необходимо расположить оси инклинометра под углом  $90^\circ$  друг к другу. К тому же необходимо определить масштабные коэффициенты для каждой оси инклинометра. То есть неизвестными параметрами инклинометра являются масштабные коэффициенты  $m_x$  и  $m_y$  (по осям ОХ и ОУ) и угол скрещивания осей инклинометра  $\varepsilon$ .
3. При выполнении измерений с астроизмерителем температура окружающей среды может изменяться в течение времени наблюдений. Изменение температуры  $\Delta T$  за время единичной серии может привести к изменению (сдвигу) показаний инклинометра. Поэтому при обработке данных измерений необходимо учесть сдвиг показаний инклинометра из-за изменения температуры. Для этого надо определять температурные коэффициенты  $k_x$  и  $k_y$  осей инклинометра в каждой серии по измерениям изменения температуры за время наблюдений.

Таким образом, в процессе измерений неизвестными калибровочными коэффициентами астроизмерителя являются:

- углы взаимной ориентации осей ПЗС-камеры и инклинометра  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ;
  - масштабные коэффициенты и угол скрещивания осей инклинометра  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $\varepsilon$ ;
  - температурные коэффициенты осей инклинометра  $k_x$ ,  $k_y$ .
4. При выполнении наблюдений астроизмеритель размещается в точке измерений свободно, без какой-либо ориентации по сторонам света. При этом необходимо вычислить составляющие УОЛ по двум направлениям: по широте и по долготе. Для этого необходимо определить параметры ориентации (матрицу ориентации) ПЗС-сенсора (обозначим эту матрицу  $A$ ) в топосцентрической горизонтальной СК (будем называть её местной СК) [4].

5. Будем предполагать, что вектор силы тяжести  $\mathbf{g}$  в местной СК является нормированным в соответствии с (3).
6. Инклинометр определяет текущие углы наклона телескопа относительно отвесной линии. Обозначим показания инклинометра (два угла по осям ОХ и ОУ) —  $inclX, inclY$ .
7. Встроенный датчик температуры в инклинометре позволяет определить изменения температуры  $\Delta T$  за время наблюдений.  
Таким образом, параметрами, характеризующими астроизмеритель, являются:

1) *измеряемые и вычисляемые параметры:*

- матрица  $A$ , определяющая ориентацию ПЗС-сенсора в местной СК;
- показания инклинометра по двум осям  $inclX, inclY$ ;
- изменение температуры за время единичной серии  $\Delta T$ ;

2) *неизвестные параметры (всего 10 параметров):*

- углы взаимной ориентации осей ПЗС-камеры и инклинометра  $\varphi, \theta, \psi$ ;
- масштабные коэффициенты и угол скрещивания осей инклинометра  $m_x, m_y, \varepsilon$ ;
- компоненты нормированного вектора силы тяжести в местной СК  $n_x, n_y$ ;
- температурные коэффициенты осей инклинометра  $k_x, k_y$ .

Таким образом, вектор неизвестных параметров астроизмерителя выглядит следующим образом:

$$X = (n_x, n_y, \varphi, \theta, \psi, m_x, m_y, \varepsilon, k_x, k_y).$$

### **Вычисление параметров астроизмерителя**

Рассмотрим формулы, которые позволяют определять неизвестные и вычисляемые параметры астроизмерителя.

1. Углы  $\varphi, \theta, \psi$  взаимной ориентации осей инклинометра и ПЗС-сенсора можно определить с использованием матриц поворота вокруг осей ОХ, ОУ и ОZ. Они выглядят следующим способом [1]:

$$R_x(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$R_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Итоговая матрица поворота из СК ПЗС-сенсора в СК инклинометра равна произведению трёх матриц и имеет вид:

$$R = R_z(\varphi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_z(\psi). \quad (5)$$

2. Масштабные коэффициенты  $m_x$ ,  $m_y$  и угол скрещивания осей инклинометра  $\varepsilon$  можно вычислить с использованием матрицы вида:

$$M = \begin{pmatrix} m_x \sin \varepsilon & m_x \sin \varepsilon & 0 \\ 0 & m_y & 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

3. Для оценки температурных коэффициентов осей инклинометра  $k_x$ ,  $k_y$  необходимо определить изменение температуры в течение единичной серии измерений. Это можно сделать, если в каждом стационарном положении телескопа записывать текущее значение температуры. Температурные коэффициенты определяют смещение показаний инклинометра относительно показаний при заданной температуре  $T_0$  (в качестве  $T_0$  можно использовать температуру при первом измерении в каждой единичной серии):

$$\begin{aligned} inclX &= inclX' + k_x(T_{end} - T_0); \\ inclY &= inclY' + k_y(T_{end} - T_0), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $k_x$ ,  $k_y$  — температурные коэффициенты;  $inclX'$ ,  $inclY'$  — начальные показания инклинометра без учёта смещения из-за температуры;  $T_0$  — температура в первом стационарном положении телескопа;  $T_{end}$  — температура в последнем стационарном положении телескопа;  $inclX$ ,  $inclY$  — скорректированные показания инклинометра с учётом смещений из-за температуры.

4. Для вычисления матрицы ориентации  $A$  ПЗС-сенсора в местной СК необходимо выполнить следующие действия:

- средние координаты звёзд из звёздного каталога, представленные в Международной небесной системе координат (ICRS), пересчитываются в наблюдаемые координаты в небесной промежуточной системе координат (CIRS) с учётом всех значимых факторов (годовая и суточная абберации, прецессия и нутация Земли, гравитационное искривление света и т.д.) [1]. Затем выполняется идентификация звёзд из изображения со звёздами из звёздного каталога, и вычисляется матрица поворота из СК ПЗС-сенсора в СК CIRS ( $SENSORtoCIRS$ ) путём получения значений направляющих единичных векторов, связанных с плоскостью ПЗС-сенсора;
- вычисляется матрица перехода из СК CIRS в СК ITRS (обозначим эту матрицу как  $CIRStoITRS$ ) с учётом времени экспозиции кадра звёздного неба, информации о движении полюса и поправок ко времени, полученных из бюллетеней Международной службы вращения Земли;
- вычисляется матрица поворота из СК ITRS в местную СК ( $ITRStoNWU$ ) с учётом геодезических координат местоположения;
- вычисляется матрица  $A$  на основе перемножения вычисленных выше трёх матриц:

$$A = ITRStoNWU \times CIRStoITRS \times SENSORtoCIRS.$$



где  $N$  — количество измерений ( $N \geq 10$ );  $inclX_i, inclY_i$  — измеренные значения инклинометра в  $i$ -ом стационарном положении телескопа, пересчитанные в проекции вектора силы тяжести единичной длины (синусы соответствующих углов показаний инклинометра).

Нелинейная оптимизация запускается с начальными значениями:

$$X = \left( 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, \frac{\pi}{2}, 0, 0 \right).$$

Оптимизация производится методом Марквардта — Левенберга с численным вычислением производных [6, 7]. После оценки искомых значений  $n_x, n_y$  составляющие УОЛ вычисляются по формулам (4).

Таким образом, новый метод измерений УОЛ с астроизмерителем предполагает получение кадров звёздного неба, значений показаний инклинометра и температуры окружающей среды в единичной серии измерений при разных наклонах телескопа. Измерения в каждой серии могут выполняться в произвольных направлениях оптической оси телескопа и при произвольных углах в горизонтальной плоскости и отличаться от серии к серии. При этом требования к углам поворота телескопа в горизонтальной плоскости и стабильности положения горизонтального основания, на котором располагается астроизмеритель, отсутствуют. Важным условием является отсутствие воздействий на астроизмеритель (дуновение ветра, облако на небе и др.) при непосредственной записи показаний инклинометра и кадра звёздного неба в каждом отдельном стационарном положении.

Алгоритм нового метода представлен на рис. 1.

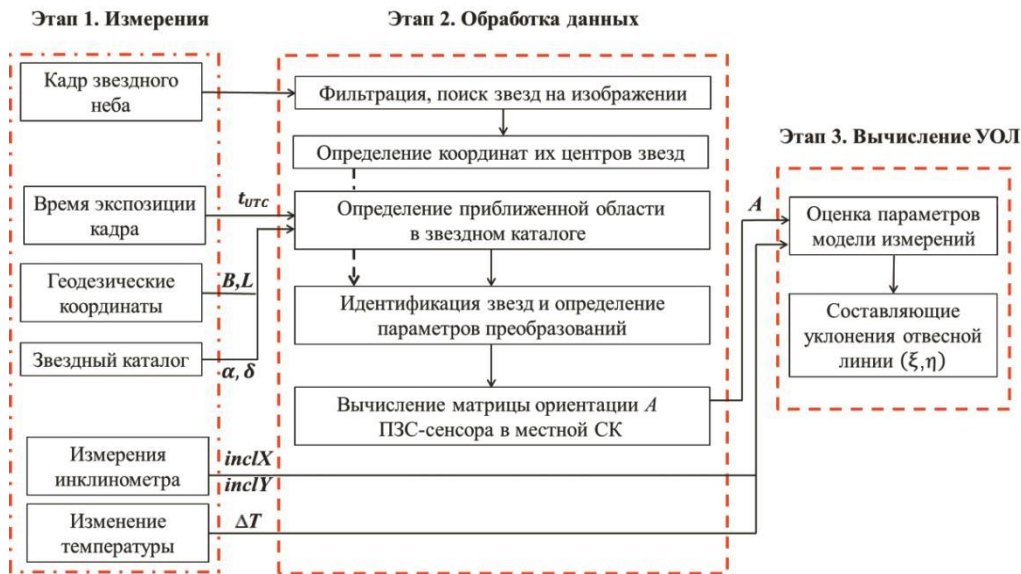


Рис. 1. Алгоритм нового предлагаемого метода измерений УОЛ



Алгоритм нового метода включает 3 этапа.

1. *Измерения*: получение кадра звёздного неба, определение времени экспозиции, определение текущего наклона телескопа, измерение температуры и определение геодезических координат в каждом  $i$ -ом стационарном положении телескопа ( $i \geq 10$ ). При этом заранее известны данные звёздного каталога, поправки ко времени из бюллетеней IERS и координаты полюса.
2. *Обработка данных*: нахождение звёзд на изображении и определение координат их центров, идентификация звёзд, определение параметров преобразований и вычисление матрицы ориентации  $A$  для всех кадров звёздного неба.
3. *Вычисление УОЛ*: оценка параметров модели измерений в соответствии с (9) и вычисление значений составляющих УОЛ в соответствии с (4).  
Один из способов реализации нового метода представлен на рис. 2.

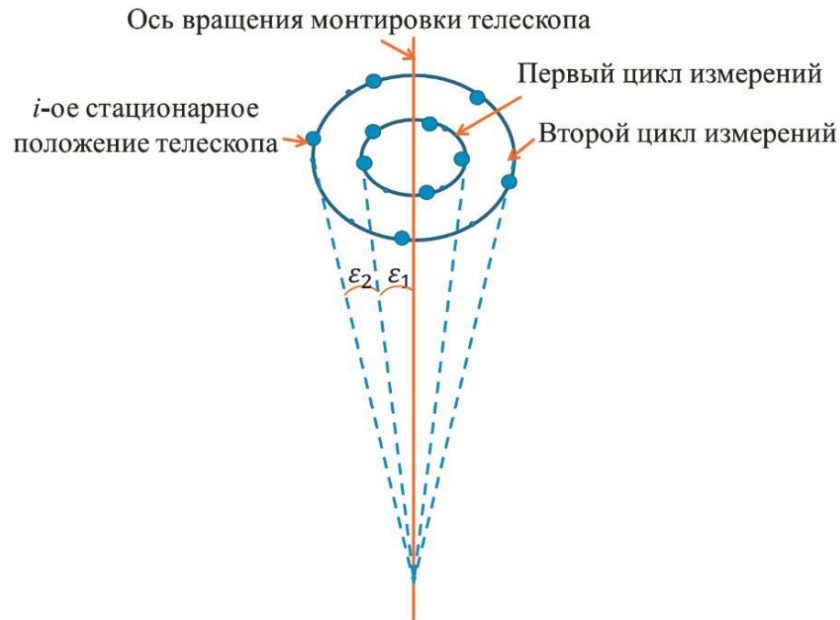


Рис. 2. Пример реализации нового метода измерений УОЛ с астроизмерителем

При этом процесс измерений с новым методом предполагает вращение телескопа, ПЗС-камеры и инклинометра вокруг вертикальной оси с установленным количеством шагов в горизонтальной плоскости. Этот процесс совершается дважды: с «начальным» зенитным углом  $\varepsilon_1$  (первый цикл наблюдений) и с зенитным углом  $\varepsilon_2$ , установленным пользователем (второй цикл наблюдений). Под «начальным» зенитным углом понимается состояние изначального выравнивания астроизмерителя в горизонтальной плоскости по показаниям инклинометра.

Рассмотрим операции, выполняемые с новым методом.

1. Перед первым циклом наблюдений предварительно выставляется строительная ось трубы телескопа относительно оси вращения монтировки по показаниям инклинометра («начальный» зенитный угол  $\varepsilon_1$ ).
2. Проводится первый цикл наблюдений звёздного неба не менее чем в пяти стационарных положениях телескопа при вращении его монтировки вокруг вертикальной оси.
3. В каждом стационарном положении телескопа первого цикла наблюдений получают кадр изображения звёздного неба, записывают текущий наклон телескопа, время экспозиции кадра звёздного неба и геодезические координаты.
4. Наклоняется строительная ось трубы телескопа относительно изначального угла  $\varepsilon_1$  на другой угол  $\varepsilon_2$ . При этом угол  $\varepsilon_2$  должен находиться в диапазоне измерений инклинометра.
5. Проводится второй цикл наблюдений звёздного неба не менее чем в пяти стационарных положениях телескопа при вращении его монтировки вокруг вертикальной оси.
6. В каждом положении телескопа второго цикла наблюдений получают кадр изображения звёздного неба, записывают текущий наклон телескопа, время экспозиции кадра звёздного неба и геодезические координаты. Два цикла наблюдений представляют собой единичную серию. Общее количество стационарных положений телескопа в обоих циклах должно быть не меньше количества неизвестных параметров.
7. В каждом кадре определяют пиксельные координаты звёзд в кадре. Затем выполняют идентификацию звёзд из изображения с использованием звёздного каталога и определяют параметры преобразований между пиксельными координатами звёзд из изображения и экваториальными координатами звёзд из каталога, с использованием которых осуществляется преобразование координат центра кадра (ПЗС-сенсора) в экваториальные координаты. Затем определяют полную матрицу поворота  $A$  из местной СК в СК ПЗС-сенсора [5].
8. После обработки данных измерений единичной серии формируется целевая функция, зависящая от 10 неизвестных параметров модели (9), решение которой позволяет оценить и калибровочные коэффициенты, и текущие значения составляющих УОЛ.

Основным требованием достоверности измерений с новым методом является жёсткость системы телескоп — ПЗС-камера — инклинометр. От точностных характеристик поворотного устройства и жёсткости горизонтальной плоскости месторазмещения астроизмерителя точность итоговых решений не зависит.

Основными преимуществами предложенного метода являются:

- в каждой серии измерений происходит одновременное оценивание и учёт всех калибровочных коэффициентов астроизмерителя, т.е. происходит «автокалибровка» прибора. Это позволяет избежать дополнительных погрешностей, вызванных изменением калибровочных коэффициентов между сериями измерений;
- процесс «автокалибровки» астроизмерителя повышает оперативность измерений УОЛ в силу отсутствия необходимости определения калибровочных коэффициентов перед началом измерений в каждой точке;
- отсутствуют требования к точности углов поворота при вращении прибора вокруг оси в горизонтальной плоскости. Это позволяет упростить конструкцию астроизмерителя;
- отсутствуют требования к обеспечению жёсткости основания, на котором размещается астроизмеритель. Это позволяет выполнять наблюдения на любом твёрдом основании (грунтовые, асфальтовые дороги и площадки). Это особенно важно при измерениях в полевых условиях.

### **Исследование изменения калибровочных коэффициентов астроизмерителя**

Как было отмечено выше, в традиционном методе измерений калибровочные коэффициенты, определённые перед началом наблюдений, используются в дальнейшем как постоянные величины. В связи с этим необходимо проведение исследований по оценке изменений калибровочных коэффициентов астроизмерителя и их влияний на итоговые значения УОЛ.

Пример значения калибровочных коэффициентов, а именно масштабных коэффициентов осей инклинометра  $m_x$  и  $m_y$  в каждой серии и их изменение между сериями в течение наблюдательной ночи, представлен на рис. 3.

Как видно из рис. 3, наблюдается изменение коэффициентов  $m_x$  и  $m_y$  в течение наблюдений в одной точке, причём изменения происходят случайным образом.

Выполним оценку влияния изменения коэффициентов  $m_x$  и  $m_y$  в течение наблюдения в одной точке на итоговые значения составляющих УОЛ. Для этого вычислим значения УОЛ для наблюдательной точки с оценкой калибровочных коэффициентов для каждой серии в соответствии с предложенным методом. Затем вычислим значения УОЛ для той же наблюдательной точки, но при этом калибровочные коэффициенты, определённые в первой серии (см. рис. 3), используем как постоянные значения для всех остальных серий.

На рисунках 4а, б приведены кривые изменения вычисленных значений УОЛ в зависимости от номера серии (кривые 1 и 3) и изменение калибровочных коэффициентов (кривые 2 и 4).

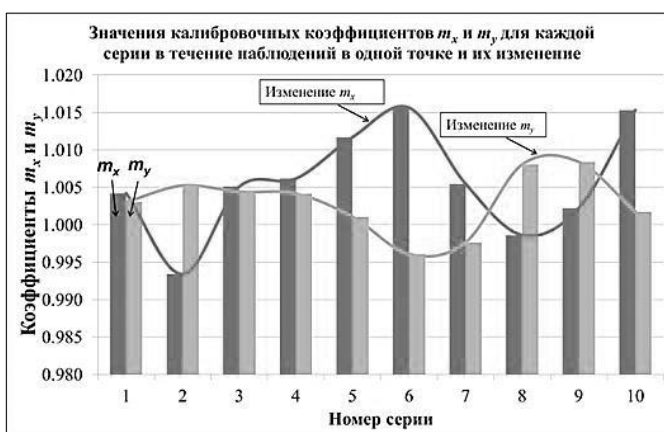


Рис. 3. Значения калибровочных коэффициентов  $m_x$  и  $m_y$  и их изменение в течение наблюдений в одной точке



Рис. 4. Разности УОЛ, вычисленные с оценкой калибровочных коэффициентов для каждой серии и без их оценки, и изменение коэффициентов:  
 а — по широте и  $m_x$ ; б — по долготе и  $m_y$

Как видно из рис. 4, наблюдается чёткая корреляция между разностью УОЛ и изменением масштабных коэффициентов инклинометра  $m_x$  и  $m_y$ . При этом разности единичных серий могут доходить до  $0,4''$ , средняя разность УОЛ по широте составляет  $0,10''$ , а по долготе  $-0,01''$ .

Таким образом, неконтролируемое изменение калибровочных коэффициентов приводит к смещению значений УОЛ, т.е. к появлению дополнительной погрешности вычислений УОЛ. Это подтверждает необходимость уточнения значений калибровочных коэффициентов в каждой серии в течение наблюдений в каждой точке. Это и выполняется в предложенном методе, что ещё раз подтверждает целесообразность её использования.

### Испытания нового метода на макете астроизмерителя

Испытания нового метода измерений УОЛ в условиях реального звёздного неба были выполнены на макете астроизмерителя [8] на пяти географических точках в Московской, Калужской и Новгородской областях. Испытания в каждой точке состояли из серии измерений по два цикла. Каждый цикл включал 12 стационарных положений телескопа в горизонтальной плоскости. Длительность каждой серии измерений составляла не более 6 минут.

Рассмотрим пример испытаний для одной точки. Она представляет собой бетонный постамент размером  $80 \times 80 \times 60$  см. Место тихое, спокойное, вдалеке от источников засветки и автомобильных дорог. Среднее количество звёзд в кадре — около 100.

Испытания на точке проводились в течение двух ночей подряд. В каждую наблюдательную ночь выполнялись 6 серий измерений. Результаты испытаний для каждой наблюдательной ночи представлены в таблице (разности для каждой серии относительно среднего значения и СКО всех серий по обеим составляющим УОЛ).

Таблица

Пример испытаний нового метода с астроизмерителем для единичной точки

№ серии и СКО	Номер наблюдательной ночи			
	1		2	
	$\xi_i - \bar{\xi}$	$\eta_i - \bar{\eta}$	$\xi_i - \bar{\xi}$	$\eta_i - \bar{\eta}$
1	0,08"	-0,27"	-0,10"	-0,16"
2	0,12"	0,01"	-0,05"	0,19"
3	-0,04"	-0,04"	0,15"	0,05"
4	-0,17"	0,10"	-0,13"	-0,03"
5	0,07"	0,06"	0,26"	-0,25"
6	-0,05"	0,20"	-0,13"	0,18"
СКО	0,11"	0,16"	0,17"	0,18"

Как видно из таблицы, СКО определения составляющих УОЛ не превышает 0,18". Также следует заметить, что разность значений составляющих УОЛ в течение двух ночей подряд не превышает 0,03". Это характеризует высокую повторяемость результатов испытаний разработанного метода.

Результаты испытаний нового метода с астроизмерителем на всех точках представлены на рис. 5.

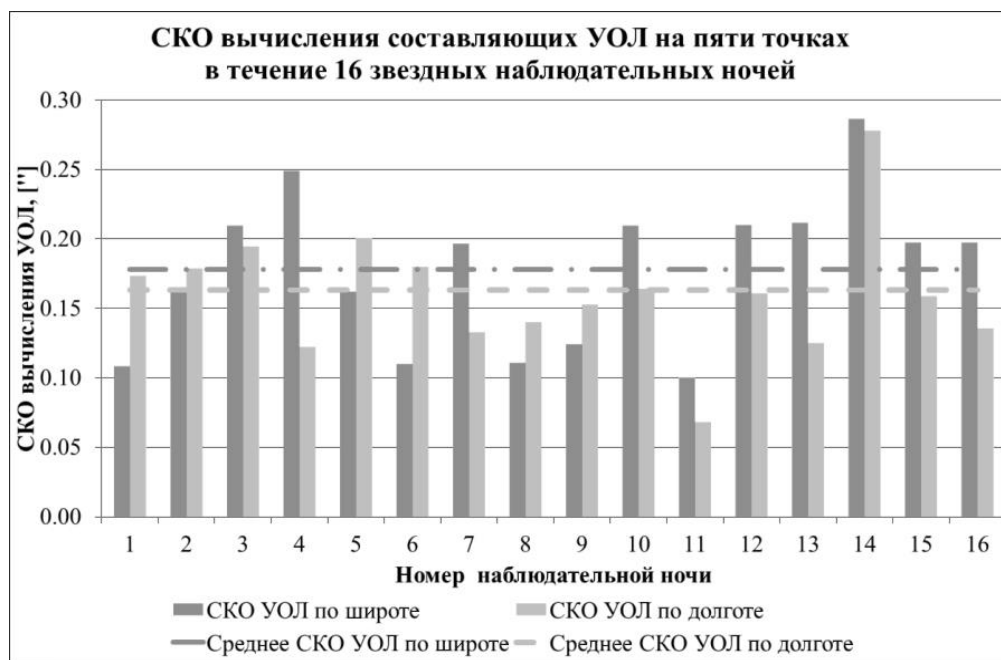


Рис. 5. СКО определения составляющих УОЛ на 5 опорных точках в течение 16 наблюдательных звездных ночей

Как видно из рис. 5, среднее значение СКО определения составляющих УОЛ не превышает 0,2". СКО некоторых единичных измерений не превышает 0,1".

### Заключение

Разработан новый метод измерений УОЛ с астроизмерителем, обеспечивающий возможность «автокалибровки» параметров прибора в течение сеанса измерений в каждой серии. Предложенный метод измерений не требует устройства специального жёсткого измерительного бетонного основания.

Проведены испытания предложенного метода с помощью макета астроизмерителя на пяти географических точках в Московской, Калужской и Новгородской областях в течение 16 наблюдательных ночей. В соответствии с особенностями метода в каждой серии происходят оценка и учёт всех

калибровочных коэффициентов. Результаты испытаний подтвердили повышение оперативности и точности измерений:

- время проведения серии измерений сокращается с 1,5 ч до 30 минут;
- среднее квадратическое отклонение измерений не превышает 0,2".

### Литература

1. Жаров В.Е. Сферическая астрономия. Фрязино, 2006. 480 с.
2. Somieski, A. Astrogeodetic Geoid and Isostatic Considerations in the North Aegean Sea, Greece: a dissertation submitted to the ETH Zurich for the degree of Doctor of Sciences. 2008.
3. Бровар В.В. Гравитационное поле в задачах инженерной геодезии. М.: Недра, 1983. 112 с.
4. Клепко В.Л., Александров А.В. Системы координат в геодезии. Екатеринбург: Издательство УГГУ, 2011. 114 с.
5. Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф., Пругло А.В., Равдин С.С. Метод компенсации погрешности наклона оси телескопа в астроизмерителе уклонения нормали к геоиду [Электронный ресурс] // *Астрономический журнал*. 2018. Т. 95. № 12. URL: <http://www.alglib.net/>.
6. Levenberg K. A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares // *Quart. Appl. Math.* 1944. V. 2. P. 164–168.
7. Marquardt D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1963. 11 (2). P. 431–441.
8. Мурзабеков М.М. Астроизмеритель уклонений отвесной линии разработки ФГУП «ВНИИФТРИ» / Доклады V Научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке», 23 марта 2017 г. ФГУП «ВНИИФТРИ». С. 152–156.